



HAL
open science

Analyses de la disponibilité économique des métaux rares dans le cadre de la transition énergétique

Florian Fizaine

► **To cite this version:**

Florian Fizaine. Analyses de la disponibilité économique des métaux rares dans le cadre de la transition énergétique. Economies et finances. Université de Bourgogne, 2014. Français. NNT : 2014DIJ0E004 . tel-01127141

HAL Id: tel-01127141

<https://theses.hal.science/tel-01127141v1>

Submitted on 7 Mar 2015

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

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

UNIVERSITE DE BOURGOGNE

FACULTE DE SCIENCES ECONOMIQUES ET DE GESTION

THÈSE

Pour l'obtention du grade de
Docteur de l'Université de Bourgogne
Discipline : Sciences Economiques

Présentée et soutenue publiquement par :

Florian FIZAINE

Le 6 octobre 2014

Analyses de la disponibilité économique des métaux rares dans le cadre de la transition énergétique

Directeurs de thèse :

Catherine BAUMONT

Frédéric LANTZ

Membres du jury :

AYONG LE KAMA Alain	Professeur à l'Université de Paris X Nanterre, Examineur
BAUMONT Catherine	Professeur à l'Université de Bourgogne, Directeur
CRIQUI Patrick	Directeur de recherches CNRS Grenoble 2, Examineur
GEOFFRON Patrice	Professeur à l'Université Paris Dauphine, Rapporteur
LANTZ Frédéric	Professeur à l'IFP School, Co-directeur
PERCEBOIS Jacques	Professeur à l'Université de Montpellier 1, Rapporteur

La faculté n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses. Les opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier les membres du Laboratoire d'Economie de Dijon (Lédi) pour m'avoir accueilli au sein de leurs unités.

J'adresse mes remerciements à mes directeurs de thèses universitaires, Catherine Baumont et Frédéric Lantz pour leurs précieux conseils, leur encadrement, et leurs éclairages au cours de ma thèse. Je tiens à remercier tout particulièrement Patrice Geoffron et Jacques Percebois qui ont accepté d'être les rapporteurs de cette thèse ainsi qu'Alain Ayong Le Kama et Patrick Criqui qui ont tous offert une partie de leur temps précieux pour me faire l'honneur de participer à ce jury.

Je tiens tout particulièrement à exprimer ma reconnaissance envers Marie-Claude Pichery pour m'avoir guidé et fait partager son savoir dans les premiers mois de ma thèse.

Je souhaiterais aussi exprimer toute ma gratitude envers Sébastien Ganneval et Grégory Jannin de l'université Paris Panthéon Sorbonne pour leur aide précieuse sur un chapitre de cette thèse.

Je remercie également Mme Quemere, M. Catier, M. Bordigoni et l'ensemble des chercheurs du département EPI du centre EDF des Renardières pour m'avoir fait bénéficier de nos échanges particulièrement profitables, sans oublier évidemment les apports des recherches salutaires et fructueuses d'Amélie Schell menés dans le cadre de ces rencontres.

Cette thèse n'aurait sans doute pas été possible sans le soutien et les encouragements quotidiens de ma compagne Sonia Momplot. J'aimerais remercier tout autant mes parents pour m'avoir soutenu et financé pendant une partie de mes études.

Mon amitié va également à l'ensemble des doctorants du laboratoire du Lédi et du CREGO pour leur accueil, leur sympathie et leur disponibilité.

Je dois reconnaître aussi à mon passif, l'aide inestimable et absolument non monétarisable fournie généreusement par Victor Court, Gwendoline Fizaine, mes parents, Monica, Alain et Cyril Momplot, et sans qui cette thèse n'aurait pas vu le jour.

Enfin, je suis reconnaissant envers toutes les personnes ayant collaboré à mes travaux ainsi qu'à la totalité des enseignants et professeurs m'ayant transmis la passion de l'économie et qui ne seraient pas cités dans ces remerciements.

SOMMAIRE

Table des figures	8
Table des tableaux	13
Table des notations	16
INTRODUCTION GENERALE.....	18
PARTIE I - COMPREHENSION DE LA DISPONIBILITE ECONOMIQUE DE LONG TERME DES METAUX RARES	25
CHAPITRE 1 : FONDEMENTS ECONOMIQUES DES METAUX RARES ET ROLES JOUES DANS LES NOUVELLES TECHNOLOGIES DE L'ENERGIE	27
1 Introduction	27
2 Les typologies existantes	28
3 Evaluation d'une typologie économique via l'ACP et le CAH.....	35
4 Fondamentaux économiques sous jacents	52
5 Implication des métaux rares dans les nouvelles technologies de l'énergie.....	56
6 Conclusion	62
CHAPITRE 2 : LA THEORIE DE L'EPUISEMENT DES RESSOURCES NATURELLES : UNE PERSPECTIVE INTERDISCIPLINAIRE	64
1 Introduction	64
2 De la nature comme source de l'économie à la nature comme contrainte	72
3 L'épuisement des ressources naturelles, un enjeu pour l'Etat et les entreprises	77
4 Les remises en causes avant-gardiste de l'épuisement en période de croissance.....	86
5 Le regain de considération pour la sphère des ressources naturelles	106
6 Conclusion	129
CHAPITRE 3 : LE PRIX ET LES AUTRES INDICATEURS DE RARETE ET DE L'EPUISEMENT D'UNE RESSOURCE NATURELLE	137

1	Introduction	137
2	Les indicateurs géologiques de la rareté.....	140
3	Les indicateurs économiques de la rareté.....	152
4	Les indicateurs sociaux-environnementaux de la rareté.....	171
5	Application au cas des métaux rares : quel(s) indicateur(s) de la rareté ?.....	186
6	Conclusion.....	194
PARTIE II CONTRAINTES AFFECTANT LA DISPONIBILITE ECONOMIQUE DES METAUX RARES.....		196
CHAPITRE 4 : CONTRAINTE DE PRODUCTION LIEE A L'EXTRACTION EN SOUS-PRODUIT DES METAUX RARES		198
1	Introduction	198
2	Analyse du lien théorique entre un sous-produit et son produit primaire	202
3	Analyse empirique du lien entre sous-produit et produit primaire.....	210
4	Evaluation prospective de la saturation de l'offre potentielle	217
5	Conclusion.....	225
CHAPITRE 5 : ANALYSE DES RISQUES ATTACHES A L'ABSENCE DE MARCHE ORGANISE.....		227
1	Introduction	227
2	Causes concourant à la création de marché à terme	229
3	Conséquences d'une absence de marché à terme sur le profil optimal d'extraction d'une ressource épuisable	236
4	Impact résultant de l'introduction de marché à terme	243
5	Conclusion.....	265
CHAPITRE 6 : CONTRAINTE D'EPUISEMENT DE LA RESSOURCE		268
1	Introduction	268
2	Des études de criticité perfectibles	269

3	Energie et métaux : une nouvelle lecture des perspectives associées à la transition énergétique.....	280
4	Déconcentration de l'énergie et des métaux : une perspective de très long terme..	288
5	Conclusion.....	298
	CONCLUSION GENERALE.....	301
	BIBLIOGRAPHIE.....	309
	ANNEXES.....	335
1	Annexes au chapitre 1.....	335
2	Annexes au chapitre 2.....	339
3	Annexes au chapitre 3.....	343
4	Annexes au chapitre 4.....	349
5	Annexes au chapitre 5.....	356
6	Annexes au chapitre 6.....	376
	Table des matières.....	379
	RESUME/ABSTRACT.....	385

Table des figures

Figure 1-1 Classification périodique des éléments de Mendeleïev. Source : Wikipedia.....	30
Figure 1-2 Principaux marchés des métaux et répartition des métaux selon leur prix et leur production. Source : <i>auteur</i>	38
Figure 1-3 Présence des pays dans les 4 premiers producteurs mondiaux du panel de métaux étudiés. Source : données USGS, <i>calculs de l'auteur</i>	39
Figure 1-4 Métaux les plus sensibles d'un point de vue géopolitique, indice composite WGI et HHI. Source : données USGS et Banque mondiale, <i>Calculs de l'auteur</i>	39
Figure 1-5 Relation non linéaire entre le prix par unité de masse et la concentration dans la croûte terrestre.....	40
Figure 1-6 Matrice des corrélations entre les variables. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	41
Figure 1-7 Résultat du test KMO et de sphéricité de Bartlett réalisé sous SPSS. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	42
Figure 1-8 Mesures d'adéquacité de l'échantillonnage de Kaiser-Meyer-Olkin. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	43
Figure 1-9 Représentation graphique des valeurs propres et du pourcentage cumulé croissant de la variance. Source : <i>auteur</i>	44
Figure 1-10 Représentation des corrélations entre les variables et les composantes principales. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	45
Figure 1-11 Représentation des métaux sur les deux premiers axes. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	46
Figure 1-12 Représentation des corrélations entre les variables et les composantes 1 et 3. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	46
Figure 1-13 Représentation des métaux sur la première et troisième composante principale. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	47
Figure 1-14 Dendrogramme formé par la CAH sur les individus de l'échantillon. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	49
Figure 1-15 Evolution de l'inertie intra-classe selon le nombre de classes choisies. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	49
Figure 1-16 Représentation des caractéristiques générales des 5 sous groupes de la CAH. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	50
Figure 1-17 Représentation des caractéristiques générales des 3 sous groupe de la CAH. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	51

Figure 1-18 Classification hiérarchique ascendante en 3 classes. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	51
Figure 1-19 Comparaison entre la vision mixte de l'UNEP et la nouvelle classification économique des métaux. Source : <i>auteur</i>	55
Figure 1-20 Secteur de l'énergie concernés par l'usage de métaux mineurs. Source : <i>auteur</i> ..	62
Figure 2-1 Evolution de la population mondiale entre 10 000 Av. J.C. et nos jours, Source : Données United State Census Bureau et <i>adaptation de l'auteur</i>	69
Figure 2-2 Evolution de la production de cuivre depuis 3000 Av JC, Source : Hong et al. (1996, p.247)	72
Figure 2-3 Evolution du coût de production unitaire du pétrole selon les gisements envisagés, Source : IEA (2008, p.218)	75
Figure 2-4 Extrapolation de la production de cuivre à différents intervalle de temps. Source : données USGS, <i>calculs de l'auteur</i>	80
Figure 2-5 Prévision d'Hubbert sur la production américaine en 1956, Source : Hubbert (1956)	86
Figure 2-6 Technique de linéarisation d'Hubbert, prévision des ressources ultimes de cuivre. Source : données USGS et <i>calculs de l'auteur</i>	88
Figure 2-7 Linéarisation adaptée au cas du cuivre. Source : données USGS et <i>calculs de l'auteur</i>	91
Figure 2-8 Différence entre la vision traditionnelle de l'économie et l'intégration de l'environnement, Source : Adapté d'Arnim Von Gleich (2006), <i>auteur</i>	95
Figure 2-9 Comparaison des résultats du model avec l'évolution des variables réelles entre 1970 et 2000, source : Turner (2008).....	105
Figure 2-10 Evolution de l'indice des prix des métaux et minéraux en dollars constant, Données : Banque Mondiale et <i>calculs de l'auteur</i>	118
Figure 2-11 Simulation de l'effet du taux d'intérêt sur le temps d'exploitation des gisements de cuivre Canadien, Source : données de Stollery (1987), <i>calculs de l'auteur</i>	123
Figure 2-12 Distribution bimodale et unimodale de la présence d'un élément en fonction de sa concentration, Source : Skinner (2001, p.20-21).....	124
Figure 2-13 Evolution du coût énergétique par tonne de métal en fonction de sa concentration, Source : Brobst (1979, p.128)	125
Figure 2-14 Répartition des auteurs et courants liés à l'épuisement en fonction du contexte démographique, source : <i>auteur</i>	131

Figure 2-15 Evolution des recherches, des prix, et des publications liées aux terres rares suite à la crise chinoise. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	132
Figure 2-16 Evolution des indices de prix constants de différentes ressources naturelles. Source : données de la Banque Mondiale et <i>calculs de l'auteur</i>	133
Figure 2-17 Cycle de l'épuisement d'une ressource non renouvelable et ses facteurs atténuants. Source : <i>auteur</i>	134
Figure 3-1 Evolution en indice de la production et des réserves de pétrole, du prix et du R/P. Source : BP Statistical Review (2012), <i>calculs de l'auteur</i>	147
Figure 3-2 Evolution du R/P pour le cuivre de 1900 à 2010. Source : Schodde (2010, p.12)	147
Figure 3-3 Evolution du R/P classique et exponentiel pour différentes ressources. Source : USGS (2012), <i>calculs de l'auteur</i>	148
Figure 3-4 Evolution des découvertes de cuivre depuis 1900, Source : Schodde (2010, p.4)	149
Figure 3-5 Evolution des découvertes d'or de 1950 à 2010, Source : Schodde (2011, p.31).	150
Figure 3-6 Evolution de la production et des découvertes de pétrole de 1900 à 2005, Source: Sorrell et Speirs (2009, p. 5292)	150
Figure 3-7 Estimations des ressources recouvrables en cuivre. Source : Trainer (1983), USGS, <i>calculs de l'auteur</i>	152
Figure 3-8 Evolution du prix réel de 10 métaux en indice (base 100= 2010). Source : USGS, <i>calculs de l'auteur</i>	160
Figure 3-9 Evolution du prix réel de quatre ressources naturelles en indice (base 100=2000). Source : USGS, BP statistical Review (2013), U.S. department of Agriculture, U.S department of commerce, <i>calculs de l'auteur</i>	162
Figure 3-10 prix intégrant les coûts privés et les coûts sociaux. Source : <i>auteur</i>	178
Figure 3-11 Surconsommation de la ressource selon le degré d'élasticité de la demande au prix. Source : <i>auteur</i>	181
Figure 3-12 Méthodologie propre à l'internalisation de l'ensemble des coûts sociaux miniers. Source : <i>auteur</i>	183
Figure 3-13 Evolution des réserves, du R/P et R/P exponentiel pour le lithium. Source : USGS, <i>calculs de l'auteur</i>	188
Figure 3-14 Evolution du prix réel du lithium selon différents déflateurs. Source : USGS, <i>calculs de l'auteur</i>	189
Figure 3-15 Correction d'un déflateur de 0,5, 1 et 1,5 pt par an et impact sur le prix réel. Source : USGS, <i>calculs de l'auteur</i>	190

Figure 3-16 Calcul de la rente attachée au lithium via deux méthodes. Source : Rapports publics des compagnies minières, <i>calculs de l'auteur</i>	190
Figure 3-17 Evolution des réserves, du R/P et R/P exponentielle pour l'indium. Source : USGS, <i>calculs de l'auteur</i>	192
Figure 3-18 Evolution du prix réel de l'indium selon différent déflateurs. Source : USGS, <i>calculs de l'auteur</i>	192
Figure 3-19 Baisse de la demande en lithium résultant d'une intégration d'une partie des coûts sociaux. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	193
Figure 4-1 Représentation des équilibres possibles entre les marchés de produits primaires et sous-produits. Source : <i>auteur</i>	203
Figure 4-2 Réaction de la production jointe de deux produits par rapport à une variation marginale de leur prix. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	206
Figure 4-3 Cycles de prix de l'indium et découplage de la production d'indium et de zinc. Source : données USGS, <i>calculs de l'auteur</i>	209
Figure 4-4 Evaluation de la saturation de l'offre potentielle du tellure. Source : <i>calculs auteur</i>	221
Figure 5-1 Evolution de la probabilité d'apparition d'un marché à terme en fonction des valeurs des variables. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	234
Figure 5-2 Position des métaux en fonction du prix et de la production et probabilité de présence de marché à terme associée. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	236
Figure 5-3 Structure de l'offre et de la demande du molybdène et du cobalt. Source : données de l'International Molybdenum Association et du Cobalt Development Institute, <i>calculs de l'auteur</i>	249
Figure 5-4 Evolution des coefficients de variation des prix de différents métaux entre 2008 et 2013. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	252
Figure 5-5 Données utilisées dans les modèles	253
Figure 5-6 Séries de prix du molybdène et du nickel. Source : données LME et <i>Metal Bulletin</i> , <i>calculs de l'auteur</i>	257
Figure 5-7 Réponse d'impulsion sur la première période, Seuil de risque à 5% : ligne rouge. $k=2$. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	263
Figure 5-8 Réponse d'impulsion sur la seconde période, Seuil de risque à 5% : ligne rouge. $k=1$. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	263
Figure 6-1 Score de criticité et étendue de l'incertitude après normalisation de la littérature, le nombre d'études est indiqué entre parenthèse. Source : UKERC (2013c, p.19)	272

Figure 6-2 Facteurs déterminant les quantités de métaux appelées par les nouvelles technologies de l'énergie. Source : <i>auteur</i>	274
Figure 6-3 Principaux résultats issus de l'exercice de prospective. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	278
Figure 6-4 Zones d'épuisement physiques et économiques, réserves et productions cumulées de différents métaux. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	279
Figure 6-5 Evolution de l'énergie nette (échelle de gauche) et de l'énergie à extraire pour maintenir l'énergie nette en fonction du EROI (échelle de droite). Source : Données <i>Enerdata</i> et <i>calculs de l'auteur</i>	282
Figure 6-6 Evolution de la consommation finale de différents secteurs en indice (base 100=1973), Source : données IEA, <i>calculs de l'auteur</i>	285
Figure 6-7 Evolution de l'épuisement de différents métaux en fonction de leurs ressources en place. Données USGS, <i>calculs de l'auteur</i>	287
Figure 6-8 Circuit de l'épuisement des métaux et de la déconcentration des énergies. Source : <i>auteur</i>	288
Figure 6-9 Evolution des EROI de différentes énergies renouvelables d'ici à 2050 en prenant en compte l'épuisement du cuivre. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	291
Figure 6-10 Relation entre la teneur et la consommation énergétique unitaire d'un métal. Source : Données Norgate et Jahanshahi (2010) et <i>calculs de l'auteur</i>	292
Figure 6-11 Relation entre le facteur de concentration et le facteur de multiplication de la consommation énergétique unitaire. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	293
Figure 6-12 Evolution de l'EROI de différentes énergies sous l'hypothèse d'une production de métaux à partir de roches communes. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	294
Figure 6-13 Evolution de l'EROI de différentes énergies selon le degré d'épuisement des gisements de métaux mondiaux. Lecture : une teneur d'exploitation de 0,1 signifie que la teneur moyenne des gisements de métaux considérée est dix fois plus faible qu'actuellement. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	295

Table des tableaux

Tableau 1-1 Pourcentage de la variance exprimé par les composantes principales. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	43
Tableau 3-1 Coût d'extraction au niveau de concentration de la croûte terrestre et prix actuel (€/kg) des métaux. Source : Steen (2006), <i>calculs de l'auteur</i>	142
Tableau 3-2 Diagramme de McKelvey (1972) modifié par Gordon et al. (2007)	144
Tableau 3-3 Bilan des différents indicateurs concernant leurs aptitudes à répondre à certaines problématiques. Source : <i>auteur</i>	184
Tableau 4-1 Rapport des productions dans les raffineries de métaux, Source : JRC (2011), <i>calculs de l'auteur</i>	206
Tableau 4-2 Test du signe. Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%, Seuils critiques de 1,65*, 1,96**, 2,58***. Source : <i>calculs auteur</i>	210
Tableau 4-3 Tableau 3 Test de Dickey Fuller augmenté, seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : <i>calculs auteur</i>	212
Tableau 4-4 Valeurs estimées des relations de long terme. Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : <i>calculs auteur</i>	212
Tableau 4-5 Test de stationnarité pour les résidus des relations de long terme, seuil critique *-3,38 ;**-3,67 ; ***-4,32. Source : <i>calculs auteurs</i>	213
Tableau 4-6 Relation de court terme entre le sélénium et le cuivre. Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : <i>calculs auteurs</i>	214
Tableau 4-7 Relation de court terme entre le molybdène et le cuivre. Source : <i>calculs auteur</i>	214
Tableau 4-8 Résultat du test de Gregory Hansen. Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : <i>calculs auteur</i>	215
Tableau 4-9 Relation de long terme entre l'indium et le zinc sur deux périodes. Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : <i>calculs auteur</i>	216
Tableau 4-10 Relation de court terme entre l'indium et le zinc. Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	216
Tableau 4-11 Offre potentielle de plusieurs métaux rares. Source : <i>calculs auteur</i>	218
Tableau 4-12 Quantités de métaux requises pour un MWc de CIGS. Source : Bleiwas (2010) et JRC (2011)	219
Tableau 4-13 Quantités de métaux requises pour un MWc de CdTe. Source : Bleiwas (2010)	219

Tableau 4-14 Hypothèses sur le recyclage et l'efficacité d'utilisation d'ici à 2050. Source : <i>auteur</i>	220
Tableau 4-15 Hypothèse de pénétration des différentes technologies photovoltaïques. Source : JRC (2011), IEA(2010b)	220
Tableau 4-16 Comparaison entre la demande de métaux rares pour le PV et l'offre potentielle. Source : <i>calculs auteur</i>	221
Tableau 5-1 Historique des créations de marché à terme pour les métaux. Source : Carlton (1984), LME	228
Tableau 5-2 Résultat de la régression logistique. Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : calculs de l'auteur	231
Tableau 5-3 Erreur de prévision du modèle au seuil de succès de 50%. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	234
Tableau 5-4 Taille de différents ETF spécialisés sur les métaux (valeurs des actifs sous gestion)	245
Tableau 5-5 Taille approximative des marchés physiques de différents métaux en 2013 (valeurs des transactions physiques). Source : <i>calculs de l'auteur</i>	245
Tableau 5-6 Coefficient de corrélation entre présence d'un marché <i>futures</i> et niveau du coefficient de variation. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	251
Tableau 5-7 Tests de normalité, d'égalité des variances et des moyennes des coefficients de variation. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	251
Tableau 5-8 Test d'égalité des moyennes des coefficients de variation pré et post <i>futures</i> pour le molybdène. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	252
Tableau 5-9 Test d'égalité des moyennes des coefficients de variation pré et post <i>futures</i> pour le cobalt. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	252
Tableau 5-10 Résultat du test de racine unitaire avec rupture de Perron. Modèle IO1 :- -4,82*, -5,1**, -5,7*** Modèle IO2 : -5,25*, -5,55**, -6,21*** Modèle AO : -4,38*, -4,65**, - 5,28***. Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	258
Tableau 5-11 Résultat du test de Gregory Hansen. Modèle 1 :- -4,61**, -5,13*** Modèle 2 :- 4,95**, -5,47***. Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	258
Tableau 5-12 Test de cointégration de Johansen entre le prix reporté du molybdène et le prix comptant du nickel avec deux retards. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	258
Tableau 5-13 Estimation du modèle VECM entre le molybdène et le nickel, 27/03/2009- 20/09/2013, Ecart-type : (). Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	259

Tableau 5-14 Récapitulatif des tests de causalité. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	260
Tableau 5-15 Estimation du modèle VECM entre le molybdène et le nickel sur la seconde période, Ecart-type : (). Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	262
Tableau 5-16 Relation de causalité entre le nickel et le molybdène selon la période. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	264
Tableau 5-17 Relation de causalité entre les prix reportés et les prix spot du LME. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	264
Tableau 5-18 Relation de causalité entre les prix reportés et les prix spot du LME. Source : <i>calculs de l'auteur</i>	265
Tableau 6-1 Secteurs d'usages considérés pour le cobalt dans les scénarios de prospectives. Source : <i>auteur</i>	276
Tableau 6-2 Secteurs d'usages considérés pour le lithium dans les scénarios de prospectives. Source : <i>auteur</i>	276
Tableau 6-3 Hypothèses retenues selon les scénarios. Source : <i>auteur</i>	290

Table des notations

Unités SI (Système International) :

kg : kilogramme

Multiples de l'unité :

	Préfixe	Symbole
10^3	kilo	k
10^6	méga	M
10^9	giga	G
10^{12}	téra	T
10^{15}	péta	P

Unité hors SI (hors système international) :

t : tonne métrique = 10^3 kg

kt : Milliers de tonnes

Mt : Millions de tonnes

Gt : Milliard de tonnes

Tt : Milliers de milliard de tonnes

% : pourcent ou 10^{-2}

ppm : Partie Par Million ou 10^{-6}

MW: Megawatt

kW: kilowatt

tep : Tonne d'équivalent pétrole

J : Joule

Gj : Gigajoule

Btu : British Thermal Unit

kWh : kilowatt-heure

MWh : Megawatt-heure

Facteurs de conversion énergétique :

	GJ	MWh	tep
GJ	1	0,277	0,023
MWh	3,6	1	0,085
tep	41,868	11,63	1

Symboles associés aux métaux :

Métal	Symbole	Métal	Symbole
Lithium	Li	Palladium	Pd
Béryllium	Be	Argent	Ag
Bore	B	Cadmium	Cd
Magnésium	Mg	Indium	In
Aluminium	Al	Etain	Sn
Titane	Ti	Antimoine	Sb
Vanadium	V	Tellure	Te
Chrome	Cr	Baryum	Ba
Manganèse	Mn	Lanthane	La
Fer	Fe	Cérium	Ce
Cobalt	Co	Praséodyme	Pr
Nickel	Ni	Néodyme	Nd
Cuivre	Cu	Dysprosium	Dy
Zinc	Zn	Tantale	Ta
Gallium	Ga	Tungstène	W
Germanium	Ge	Rhénium	Re
Arsenic	As	Platine	Pt
Sélénium	Se	Or	Au
Strontium	Sr	Mercure	Hg
Zirconium	Zr	Plomb	Pb
Niobium	Nb	Bismuth	Bi
Molybdène	Mo		

INTRODUCTION GENERALE

En septembre 2010, la baisse soudaine des quotas à l'exportation des terres rares par la Chine - comme principale mesure de rétorsion à l'encontre du Japon - a provoqué un accroissement des prix de ces métaux mineurs compris entre 400% et 800% de leurs valeurs initiales. Cet événement marquant et les ruptures d'approvisionnement en résultant - faisant suite à d'autres entorses commises par la Chine aux règles de libre-échange¹ - font alors prendre conscience aux principaux pays de l'OCDE de la vulnérabilité de nombreuses technologies de pointe (NTIC et Nouvelles Technologies de l'Energie) face à la disponibilité d'un certain nombre de métaux. Au-delà du simple conflit géopolitique illustrant la « guerre stratégique » des matières premières, cette crise des terres rares met l'accent sur un autre point déterminant de notre futur énergétique : il devient difficile de dissocier la disponibilité énergétique de la disponibilité des matières premières.

De plus, la crise des terres rares a eu comme bénéfice immédiat, de faire rejaillir avec elle, un ensemble de problématiques liées à la disponibilité économique des matières premières. La disponibilité économique, sujet approfondi dans la thèse, à ce stade, fait référence à l'épuisement. Dès 6000 à 1500 ans avant J-C, les civilisations humaines découvrant les propriétés de l'or, du cuivre, du plomb, de l'argent, de l'étain et du fer natif se posent probablement la question de l'épuisement et de la disponibilité de ces matières premières rares aux caractéristiques si intéressantes. Comme le note Bihouix (2014), l'option la plus efficace revient à adopter la « stratégie du criquet ». Le déplacement de l'exploitation vers de nouvelles mines est alors l'un des meilleurs moyens de pallier l'épuisement local d'une mine en métaux. La lutte contre cet épuisement est d'ailleurs largement observable dans les actions des différentes cités, royaumes ou empires. Ainsi, dès 300 avant J-C les mines argentifères grecques, ayant permis le financement de la lutte contre l'envahisseur perse, sont épuisées. Plus tard, lorsque l'empire romain prend le contrôle de celle-ci, il devient nécessaire de trouver une autre source d'approvisionnement pour rééquilibrer la balance extérieure déficitaire avec l'orient. Ce sera chose faite avec la conquête de la Gaule, puis de la Dacie (la Roumanie actuelle) et surtout de l'Espagne pourvoyeuse d'or (ce qui alimentera les

¹ L'Europe et les Etats-Unis avait déjà porté plainte à l'OMC en 2009 contre la Chine pour l'application de quotas à l'export sur le phosphore jaune, l'antimoine, la bauxite, le coke, le spath fluor, l'indium, le carbonate de magnésium, le molybdène, les terres rares, le silicium, le talc, l'étain, le tungstène et le zinc.

convoitises et les guerres puniques). La conquête de la Britannia (l'Angleterre) par l'empire romain répond aussi probablement en partie à une logique de sécurisation des approvisionnements en étain (via celui des Cornouailles) donc de la fabrication du bronze. Viennent ensuite aux mines européennes de rentrer en déclin probablement dans les premiers siècles après J-C (Bihouix, 2014 ; Hong et al, 1996). Le commerce et l'échange avec l'Afrique de l'ouest sont alors la voie privilégiée d'approvisionnement en métaux. Cette contrainte, explique aussi pourquoi les conquistadors partent en quête du nouveau monde dans l'espoir de trouver de l'or et de l'argent. Une fois qu'ils pourront en partie satisfaire grâce aux mines mexicaines et péruviennes. Au XVIIIème siècle, les découvertes se poursuivent pour couvrir les besoins croissants de la révolution industrielle, tout d'abord avec la ruée vers l'or en Californie, puis l'exploration s'élargit à l'Australie, au Brésil et à l'Afrique du Sud. Une autre voie très utilisée pour accroître la disponibilité des ressources en métaux fut aussi le perfectionnement des techniques d'extraction et de raffinage des métaux. Comme les métaux à l'état natif sont rares, il faut pouvoir travailler les minerais non purs, ce que parviennent à faire les civilisations antiques grâce au feu à bois puis au four à potier. Ces premières fonderies permettent d'obtenir sous forme pure certains métaux dont le point de fusion est bas, mais il faudra attendre le Vème siècle en Chine et le XIIème siècle en Angleterre pour parvenir à la fonte du fer (1500°C) grâce aux hauts fourneaux et au charbon de bois. Au XVIIIème siècle, l'usage du coke en lieu et place du charbon de bois, desserre la contrainte en bois pesant sur métallurgie. A cette époque, pourtant, seuls sept métaux sont identifiés et seuls les développements de la métallurgie, de la chimie industrielle puis de l'électrolyse (1800) permettront de séparer la plupart des éléments sous leurs formes chimiques pures. Du côté des techniques d'extraction minières, l'invention des explosifs (la poudre noire vers 1650, la nitroglycérine en 1847 et la dynamite en 1866), suivie de la machine à vapeur (pour pomper l'eau des mines) puis du moteur diesel (1893) et de la mécanisation ont constitué des avancées majeures pour accéder à davantage de métaux (Bihouix et De Guillebon, 2010).

Le sujet de la disponibilité des métaux tombe dans un certain oubli à partir de la fin des années 1980 du fait d'une baisse généralisée du prix des matières premières. Il réapparaît en revanche depuis le milieu des années 2000 sous l'effet contraire, i.e. celui d'un accroissement de leur valeur économique.

Cette thèse souhaite s'inscrire à la fois, dans le prolongement des questions liées à la disponibilité économique des ressources non renouvelables, et dans le débat organisé autour de la transition énergétique via l'articulation entre métaux et énergie. La connexion entre ces

deux thématiques n'a donné lieu pour l'instant qu'à peu de recherches exploratoires alors qu'elle soulève une problématique générale : quelle est la soutenabilité d'une transition énergétique reposant sur des ressources énergétiques renouvelables mais dont la viabilité est fondée sur des ressources épuisables parmi lesquelles les métaux assurent un rôle essentiel ? Cette question amène naturellement d'autres interrogations. Ces métaux constituent-ils un groupe homogène aux caractéristiques propres ou bien existe-il des groupes différents par leurs profils économiques ? A quels types de contraintes la transition énergétique nous expose-elle du fait de son recours généralisé aux métaux rares ? La rareté et la disponibilité économique de long terme de ces ressources naturelles peuvent-elles représenter un frein à la transition énergétique et au développement durable de manière générale ? Possédons-nous des indicateurs anticipés susceptibles de nous prévenir d'une baisse de la disponibilité économique de long terme associée à ces ressources épuisables ?

Pour apporter des éléments de réponses à ces questions, nous procéderons comme suit. La première partie de notre thèse sera consacrée aux différents éléments des théories économiques associés à la rareté des ressources minérales afin de mieux cerner cette notion de rareté d'un point de vue économique et notamment dans le cas des métaux rares. La seconde partie de la thèse visera à étudier les contraintes amenées par l'usage de ces métaux rares dans les nouvelles technologies de l'énergie en fournissant des analyses quantitatives.

Tout d'abord, il semble se dégager la montée en puissance d'une gamme de métaux autrefois prénommés « mineurs » mais dont les adjectifs prêtés sont en réalité bien diverses : métaux verts, high-tech, petits métaux, métaux technologiques, métaux rares... Le rôle secondaire alloué anciennement à cet ensemble de métaux disparates se dissipe aujourd'hui et ces derniers, captent désormais, une part croissante de l'attention des chercheurs et des décideurs publics. Néanmoins, comme l'expliquent Christmann (2012) et Rabinovitch (2011), il existe un flou autour de la détermination même des métaux mineurs puisqu'il n'existe aucune définition officielle de ces derniers. Le **chapitre 1** aura donc pour objectif de définir le périmètre d'étude de cette thèse. C'est pourquoi nous reviendrons tout d'abord sur l'ensemble des typologies disponibles sur les métaux. Il se détache que l'essentiel des terminologies plus ou moins proches des métaux rares ne permettent pas de désigner précisément quels métaux appartiennent à ce groupe et ne font pas ressortir les caractéristiques et fondamentaux spécifiques à cette gamme de ressources. Pour y remédier, nous proposerons un cadre d'analyse multicritère, en l'occurrence une analyse en composantes principales couplée à une classification ascendante hiérarchique faisant émerger clairement les métaux regroupant les

mêmes spécificités ainsi que les faits stylisés attachés à chaque groupe. Enfin, une dernière section présentera un inventaire des rôles joués par les métaux rares dans les nouvelles technologies de l'énergie.

Dans le second chapitre, nous nous pencherons sur la question de la disponibilité économique de long terme des ressources minérales (dont les métaux rares font partie) à travers l'un de ces principaux déterminants : le facteur de l'épuisement. La question de l'épuisement des ressources naturelles émerge probablement de manière durable suite à la révolution industrielle dans un contexte de croissance tendancielle de la population mondiale et du niveau de vie par habitant. La conjugaison de ces deux phénomènes démultiplie l'impact de l'homme sur la nature et le rythme à laquelle il prélève les ressources naturelles. Toutefois, restreindre le champ d'analyse de l'épuisement des ressources naturelles à l'économie apparaît à la fois réducteur et insuffisant pour appréhender au mieux cette question. En effet, cela serait négliger l'ensemble des mécanismes non économiques agissant sur l'épuisement. C'est pourquoi, **le chapitre 2** de cette thèse entreprendra un état de l'art sur la question de l'épuisement des ressources non renouvelables dans une perspective interdisciplinaire (économie, géologie, physique, écologie). Ce chapitre précisera aussi les principaux apports académiques tenus sur la problématique de déplétion des ressources naturelles. Ainsi, nous soulignerons via l'analyse de ces théories les facteurs concourant à accélérer ou au contraire à repousser l'épuisement des ressources naturelles. Il semble également que le principal point de désaccord entre les différents champs disciplinaires soit la possibilité d'un maintien d'une croissance économique tendancielle à long terme. Nous évoquerons aussi la possibilité d'une influence de la conjoncture et du contexte historique sur ces théories décrivant le long terme.

La compréhension du phénomène de l'épuisement ne représente pourtant qu'une partie du chemin menant à une véritable délimitation du risque encouru par nos sociétés du fait de la nature épuisable des ressources minérales. En effet, la couverture de ce risque nécessite en sus, de disposer d'indicateurs pertinents, aptes à quantifier la rareté et l'épuisement d'une ressource naturelle non renouvelable. L'émergence de cette méthodologie apparaît dès le milieu du 20^{ème} siècle. En effet, l'effort de reconstruction entrepris dans l'après-guerre par les pays européens dévastés, pousse de manière considérable la demande de ressources naturelles : celle-ci passant d'une croissance moyenne de 1,21% par an entre 1900 et 1945 à une croissance moyenne de 3,3% par an entre 1945 et 1974 (Krausmann et al, 2009). Certains analystes américains y voient alors la possibilité d'un épuisement des ressources naturelles et donc la constitution d'une menace potentielle pesant sur l'approvisionnement de l'économie

américaine (Paley, 1952). Le président Truman préconise l'élaboration d'un rapport sous l'égide de la commission Paley (1952) afin de répondre à cette inquiétude. La même année, la création de la fondation *Resources For the Future* (RFF) pérennise cette problématique dans le champ de la recherche. Dès lors, les chercheurs ont constitué un ensemble d'indicateurs alternatifs, dont les champs de référence ou descripteurs ne font pas toujours consensus. Le **chapitre 3** visera, dans ce contexte, à établir les avantages et les inconvénients des indicateurs ayant pour but de signaler l'épuisement et la rareté. De nouveaux indicateurs ont été élaborés dans les années 1990-2000 pour répondre en partie à ces limites, mais les données disponibles sur les métaux mineurs n'en permettent actuellement qu'une construction partielle.

Les spécificités attachées aux métaux rares déterminées dans le chapitre 1, confèrent à leur usage des nouvelles problématiques se distinguant des autres ressources minérales. C'est pourquoi, il conviendra d'approfondir ces questions pour correctement appréhender les risques liés à l'exploitation et à la consommation de ces métaux. Nous aborderons donc dans une seconde partie, tour à tour trois de ces spécificités, à savoir : le statut de sous produit, l'absence de marché organisé, et l'épuisement (principalement qualitatif), pour déterminer si celles-ci peuvent comporter un risque pour la poursuite de la transition énergétique.

Dans cette optique, le **chapitre 4** explorera les contraintes imposées aux productions de métaux rares du fait de leurs statuts de sous-produit. Nous serons amenés à réfléchir sur les implications d'une production en sous-produit notamment en termes d'élasticité-prix. Ces résultats seront appuyés théoriquement par un modèle d'équilibre statique. Néanmoins, il existe encore dans la réalité, de nombreuses situations avec des marges de production potentielle où l'offre de sous-produit peut dévier par rapport à ces résultats théoriques. Pour établir, la vraisemblance d'une survenue de la contrainte de sous-produit, différents scénarios de prospectives - avec l'ensemble de risques et limites qu'ils comportent - seront proposés afin de déterminer si la croissance prévue de certains secteurs énergétiques pourrait éventuellement saturer cette contrainte.

Par ailleurs, les caractéristiques mêmes des marchés nous semblent être à étudier comme caractéristiques de la soutenabilité économique de la relation énergie-métaux : on observe notamment une absence quasi-systématique de marchés organisés associés aux métaux rares. Aussi, le **chapitre 5** proposera dans un premier temps de mener des recherches sur les causes de cette absence de marché à terme. Pour aller plus loin, nous utiliserons un modèle logit explicitant la probabilité pour un métal de détenir un marché à terme comme la résultante de

deux variables proxy (le prix et la production) reflétant elles-mêmes indirectement des variables plus nombreuses. Du point de vue des conséquences reliées à cette absence de marché à terme, nous reviendrons sur les discussions et les modèles suggérés par la science économique - principalement ceux de Heal (1975), Dasgupta et Heal (1979) et Lasserre (1991) - pour résoudre cette question. Ces modèles proposent différents types de chemin d'exploitation des ressources naturelles suivant les hypothèses retenues sur la formation des anticipations des agents économiques. Nous ajouterons à cela, une exploration empirique des conséquences liées à l'absence de marché à terme grâce au recours à un modèle économétrique testant les modifications des comportements des prix du molybdène et du cobalt après l'introduction de leurs marchés *futures* en 2010. Enfin, le chapitre mettra en lumière la plus forte volatilité des prix inhérente aux métaux mineurs en comparaison d'autres métaux et la domination des prix de marché sur les prix reportés lorsque les deux systèmes coexistent.

Enfin, le **chapitre 6** offrira une analyse inspirée du courant biophysique pour étudier la problématique d'épuisement des métaux sous un nouvel angle, en particulier en mobilisant l'approche de l'*Energy Return On Investment* (EROI). On repèrera un nombre croissant d'études de criticité établies sur la disponibilité des métaux liée au développement du secteur énergétique, dont les limites méthodologiques seront étudiées. Nous soulignerons notamment que la complexité des systèmes énergétiques a conduit à des substitutions multiples entre l'énergie et les métaux qui ont conduit à la dégradation de l'indicateur EROI. Une analyse prospective établie sur la demande future de lithium et de cobalt nous permettra d'apprécier les quantités de réserves nécessaires à prouver pour maintenir le ratio réserves sur production (R/P) d'ici à 2050. Néanmoins, une illustration des ressources en place de lithium et de cobalt discrédite l'intérêt porté à l'épuisement quantitatif des métaux. Il faut avant tout se porter sur l'épuisement qualitatif pour qualifier au mieux l'épuisement économique. Par conséquent, cet aspect sera analysé dans la seconde section de ce chapitre. Celle-ci révélera une dégradation qualitative de l'énergie et des métaux depuis le début du XX^{ème} siècle. Nous nous tournerons ensuite dans une troisième section, vers l'étude du lien existant entre le secteur de l'énergie et le secteur des métaux afin de mettre en avant les dynamiques de rétroaction positives en place. Ce qui nous conduira dans la dernière partie de ce chapitre, à considérer la soutenabilité de long terme de la transition énergétique grâce à la prise en compte de l'articulation entre le secteur de l'énergie et le secteur des métaux.

Nous terminerons en conclusion par une synthèse des principaux apports et résultats de la thèse. Ceci sera aussi l'occasion de proposer des prolongements possibles à la thèse ainsi que quelques recommandations en termes de politiques économiques et industrielles découlant des éclairages fournis par celle-ci.

PARTIE I - COMPREHENSION DE LA DISPONIBILITE
ECONOMIQUE DE LONG TERME DES METAUX RARES

L'objectif de cette première partie vise à délimiter le périmètre de cette thèse en identifiant les contours, les fondements et les spécificités attachés à une large gamme de métaux souvent nommés métaux mineurs ou rares. Nous verrons aussi dans cette partie, comment percevoir la disponibilité économique de long terme des ressources naturelles épuisables (dont font partie les métaux) grâce à un recours aux théories pluridisciplinaires (économie, physique, géologie, écologie...) établies sur la question. Enfin, nous aborderons l'ensemble des indicateurs suggérés par la communauté scientifique pour identifier la rareté et le niveau d'épuisement d'une ressource naturelle épuisable.

A cette fin, le premier chapitre de cette thèse évoquera, pour commencer, les différentes typologies établies sur les métaux. A l'issue de cet état de l'art sur les typologies, nous constatons qu'aucune classification ne permet de rendre compte des spécificités et des caractéristiques précises des métaux appartenant au groupe des métaux mineurs (ou métaux rares). C'est pourquoi, nous proposerons dans un second temps d'établir, grâce au recours à une analyse multicritère - analyse en composantes principales couplée à une classification ascendante hiérarchique - différents groupes de métaux (dont le groupe des métaux rares) tout en faisant ressortir les faits stylisés propres à chaque groupe. Enfin, nous montrerons grâce à un inventaire qualitatif, le rôle des métaux rares dans les nouvelles technologies de l'énergie.

Ensuite, le second chapitre de cette thèse s'attachera à dégager les principaux facteurs concourant à la détermination de la disponibilité économique de long terme d'une ressource naturelle grâce à l'étude des différentes théories issues des sciences liées à l'épuisement d'une ressource naturelle. Comme l'origine et la manifestation de l'épuisement d'une ressource est multifactorielle, il est intéressant de mobiliser des connaissances issues de plusieurs champs disciplinaires pour appréhender au mieux la réalité. Ainsi, nous ferons ressortir grâce à l'étude de ces théories les principaux déterminants de l'accélération ou du ralentissement de l'épuisement des ressources naturelles. Nous discuterons aussi de la possibilité d'une influence de la conjoncture et du contexte historique sur ces théories décrivant le long terme.

Enfin, le troisième chapitre de cette thèse sera consacré à l'analyse des indicateurs proposés par la littérature académique pour signaler correctement l'épuisement d'une ressource. Nous exposerons les principaux avantages et inconvénients de chaque indicateur et appliquerons ces indicateurs à différents métaux rares pour évaluer les signaux qu'ils transmettent.

Les résultats et les principes délimités dans la première partie de la thèse, nous permettrons ensuite de nous pencher, dans une seconde partie, sur l'analyse des contraintes posées par les métaux rares dans le cadre de la transition énergétique et d'évaluer les évolutions possibles de la disponibilité économique des métaux rares.

CHAPITRE 1 : FONDEMENTS ECONOMIQUES DES METAUX RARES ET ROLES JOUES DANS LES NOUVELLES TECHNOLOGIES DE L'ENERGIE

« Le Moyen Orient a du pétrole, la Chine a des terres rares ».

Deng Xiaoping, ancien dirigeant de la République populaire de Chine, 1992.

« Nous connaissons tous la contagion lente pour la consommation de l'acier qui va de la construction de la tour Eiffel, il y a un peu plus de 100 ans, jusqu'aux tours des villes chinoises aujourd'hui. Ici, en ce qui concerne les métaux stratégiques, c'est plutôt une épidémie galopante. C'est unique dans ma connaissance du monde des matières premières.

Tout le monde en veut pour tout et en même temps ».

Discours de Didier Julien devant l'Académie des sciences morales et politiques, 2012.

1 Introduction

Les métaux font aujourd'hui partie des ressources naturelles les plus abondamment étudiées, extraites et utilisées par nos sociétés. Ils peuvent être inclus dans le vaste ensemble hétérogène des ressources naturelles comprenant d'après la classification de l'encyclopaedia Universalis² : les ressources naturelles biologiques et minérales. Ce second groupe peut ensuite être scindé entre plusieurs types de matières premières selon Varet (2014) : les matériaux de construction (sables, gravier...), les minéraux industriels (silice, potasse, gypse, phosphates...), les ressources minérales métalliques (les métaux), les ressources minérales fossiles (gaz, pétrole et charbon) et les pierres précieuses.

Or, l'observation des différents classements des métaux existants actuellement nous poussent à proposer des nouvelles possibilités de regroupement ou du moins de souligner les faiblesses des catégories actuelles pour appréhender certaines problématiques.

En effet, les classements majoritairement utilisés furent créés au cours du XIX^{ème} voire au début du XX^{ème} siècle. Force est de constater que les usages en relative expansion de certains métaux n'apparaissent pas dans ces classements, car la technologie et les besoins environnant

² Voir l'article « Ressources naturelles » sur l'Encyclopaedia Universalis de F. Ramade.

la création de ces classifications étaient tout autre. Le contexte d'utilisation des métaux à donc très clairement orienté l'objet et le but de ces classifications.

Sans exclure bien entendu, les classifications non économiques qui remplissent des fonctions importantes pour comprendre certains besoins, nous devons admettre que ces regroupements ne facilitent pas la compréhension du rôle et des déterminants de la plupart des métaux rares. La place grandissante de ces métaux rares dans nos usages et dans nos nouvelles technologies de l'énergie requiert une compréhension accrue de leurs fondements économiques sous-jacents. Les classifications disponibles actuelles ont plutôt tendance à rejeter ces métaux dans des classes hétérogènes pour se concentrer sur les propriétés des métaux majeurs ou précieux. Elles ne permettent donc pas d'isoler les critères distinctifs des métaux rares et les lois économiques régissant leurs marchés.

Pourtant ces métaux remplissent désormais des fonctions critiques dans la plupart des hautes technologies employées dans nos économies modernes. A ce titre, il apparaît donc nécessaire de mieux saisir le caractère indispensable de ces métaux notamment dans le secteur de l'énergie.

Ce chapitre a pour but de recenser les différents types de classification existantes en apportant un éclairage sur leurs critères de discrimination. Dans un deuxième temps, il s'agira de proposer une typologie complémentaire aux autres classifications s'attachant à intégrer des critères délaissés dans les autres études mais aussi en soulignant les causes concourant à la spécificité de ces petits métaux. Enfin, une dernière partie sera consacrée à l'analyse du rôle des métaux mineurs dans les technologies énergétiques.

2 Les typologies existantes

Il existe un nombre important de classifications des métaux, le plus souvent attachées à des critères non économiques. Nous entendons par critères non économiques, des critères qui ne soient pas basés sur des indicateurs économiques (prix, PIB, coûts, ...). Parfois ces classifications dont les dénominations sont répandues dans l'usage courant, ne possèdent pas toujours des critères précis de classifications. L'objectif de cette première partie est donc d'éclairer les usages de ces classifications et le contexte environnant leur création.

2.1 Les typologies de nature physico-chimique

Métaux de base et métaux précieux (a)

Cette classification est fondée sur les propriétés chimiques des métaux. Ici, on s'intéresse à la faculté du métal à résister à la corrosion de l'air et de l'eau. Les métaux de base au sens des alchimistes n'avaient pas ces propriétés de résistance fortement recherchées comme en possèdent l'or et l'argent, et cherchaient à obtenir par une transformation chimique des métaux précieux à partir de métaux de base (transmutation). Cette classification créée certainement avant le XVIII^{ème} siècle servit en partie à faire ressortir les métaux désirables de ceux qui l'étaient moins (les métaux communs comme le cuivre). Il faut noter que l'expression métaux de base (« base metal ») est souvent utilisée aussi pour désigner les grands métaux industriels (fer, acier, cuivre, zinc, aluminium...).

Métaux ferreux et métaux non ferreux (b)

Au contraire de la précédente, cette classification a pour critère de discrimination, les propriétés magnétiques des métaux. Le fer ou les métaux contenant une proportion importante de fer sont identifiables et séparables facilement à l'aide d'un électro-aimant. Les autres métaux non ferreux sont séparables par machine à courant de Foucault. L'origine de cette classification est plus récente puisque les propriétés de conductivité mais surtout de magnétisme des métaux ferreux ne furent découvertes qu'au cours du XIX^{ème} siècle. L'activité de recyclage³ justifie en grande partie l'intérêt actuel de cette classification.

La classification de Mendeleïev (c)

La classification périodique de Mendeleïev construite en 1869 est une classification des éléments qui repose sur le nombre d'atomes et qui permet d'identifier des nouvelles catégories de métaux. Dans cette classification les métaux sont regroupés par numéro atomique croissant⁴ et en fonction de leur configuration électronique de sorte que les éléments d'une même classe manifestent des propriétés physiques et chimiques similaires. La justification de ces comportements physicochimiques similaires s'explique par la configuration électronique des éléments d'un même groupe. On distingue ainsi des métaux alcalins, des métaux alcalino-terreux, des métaux de transition, des métaux pauvres, des lanthanides et des actinides. Cette classification peut avoir plusieurs usages. Elle permet d'expliquer en un sens certaines associations de métaux dans des minerais et leur comportement lors de la séparation. On peut l'utiliser aussi pour visualiser grossièrement quel

³ Voir l'explication de l'ADEME sur ce point :

<http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?m=3&cid=96&catid=14795>.

⁴ Le numéro atomique représente le nombre de protons qui constituent l'atome d'un élément.

pourrait être les substituts proches d'un matériau remplissant des fonctions techniques précises dans un produit.

Tableau périodique des éléments

Le tableau périodique des éléments est présenté avec les groupes (1 à 18) et périodes (1 à 7) indiqués. Les éléments sont classés par couleur selon leur nature chimique :

- métaux alcalins** (rouge)
- alcalino-terreux** (orange)
- lanthanides** (rose)
- actinides** (violet)
- métaux de transition** (bleu-vert)
- métaux pauvres** (gris)
- métalloïdes** (vert)
- non-métaux** (jaune)
- halogènes** (orange-rouge)
- gaz nobles** (bleu)

Les légendes indiquent également les états de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa), le numéro atomique, le symbole chimique et la masse atomique relative.

Figure 1-1 Classification périodique des éléments de Mendeleïev. Source : Wikipedia

2.2 Les typologies de nature géologique

La classification de Craig et al (2001), une classification géologique (a)

La classification de Craig et al (2001) tend à se populariser au cours des ans depuis la première publication de leur ouvrage *Resources on the earth* en 1988. Il n'est pas surprenant que le critère supérieur de discrimination de cette équipe de géologues soit un indice d'abondance géologique. La concentration moyenne des métaux dans la croûte terrestre sert en effet de base pour discriminer les métaux abondants des métaux rares. En dessous de 0,1% (1000ppm), le métal est considéré comme rare alors qu'au dessus de ce seuil, il appartiendra à la classe des métaux abondants. La plupart des métaux sont rares au sens géologique, si bien qu'il est plus rapide de lister les métaux abondants : fer, aluminium, silicium, magnésium, manganèse, titane. La dernière classe des métaux rares est ensuite subdivisée en quatre classes selon des critères d'usage :

- Les métaux ferreux d'alliage (améliore les alliages à base de fer, en particulier l'acier)
- Les métaux de base.

- Les métaux précieux.
- Les métaux spéciaux (en déploiement, à la base des nouvelles technologies).

On reprochera à cette classification deux inconvénients principaux. En premier lieu, un poids manifestement trop lourd attribué à l'abondance géologique qui ne détermine pas en totalité la rareté économique et les usages des métaux. Simplement parce que les degrés de concentration minimum requis pour les métaux varie selon ces derniers et aussi parallèlement aux techniques utilisées. En second lieu, le deuxième critère est très instable car les usages des métaux varient. Un certain nombre des métaux du groupe des platinoïdes ne possède pas d'usage en bijouterie et pourrait être considérés davantage comme des métaux spéciaux alors qu'ils sont intégrés dans les métaux précieux.

2.3 Les typologies de nature économique

Métaux majeurs et métaux mineurs (a)

Ici, le critère est d'ordre productif puisque on sépare les métaux majeurs (« *major metals* ») des métaux mineurs (« *minor metals* »). On identifiera les métaux majeurs par leurs plus-values importantes apportées à l'économie, mais aussi par une abondance géologique plus élevée justifiant leur extraction en tant que produit primaire dans la plupart des gisements miniers. Au contraire, les métaux mineurs n'ont pas une concentration suffisamment grande pour être extrait seul de façon rentable. D'un point de vue formel les métaux mineurs sont définis par Hagelüken et Meskers (2010, p.166):

«“Minor” can refer to metals that have relatively low production or usage, which occur in low ore concentrations, are regarded as rare, or are not traded at major public exchanges (e.g., the London Metal Exchange). The term is also used for “special metals” that have rather unique properties without being major or mass metals ».

D'une façon plus ancienne, Brooks (1965) établit de façon claire une liste des métaux mineurs en les différenciant des minéraux et des métaux majeurs. Les métaux contrairement aux minéraux ne peuvent pas être utilisés directement dans la forme où ils existent dans la nature au contraire des minéraux. La séparation entre métaux majeurs et mineurs est, quant à elle créée sur une limite un peu arbitraire de production de 75 kt par an. C'est la première classification qui identifie quelques spécificités des petits métaux et qui souhaite véritablement les caractériser. D'une façon plus récente, la *Minor Metal Trade Association*⁵ a

⁵ <http://www.mmta.co.uk/>

établi une liste de métaux mineurs en fonction de la présence ou l'absence de marché organisé. Par ailleurs, une note du Commissariat général à la stratégie et à la prospective (2013) remarque qu'aucun des métaux présents dans cette liste ne détient une production annuelle supérieure à 300 kt.

La classification de l'UNEP, un exemple de classification mixte (b)

La classification de l'United Nation Environment Program (UNEP) représente un exemple d'une classification regroupant les critères des classifications précédentes. En effet, cette classification reconnaît quatre groupes principaux de métaux : les métaux ferreux, les métaux non ferreux, les métaux précieux et les métaux spéciaux. Cette classification est disponible dans leur dernier rapport sur le niveau de recyclage des métaux (UNEP, 2011b).

Métaux selon les secteurs d'usage (c)

Des classifications ayant pour critère le secteur d'usage du métal sont aussi souvent employées. On parle ainsi de métaux verts pour les métaux favorisant l'essor des technologies favorables à l'environnement (énergies vertes), ou de métaux high-tech pour ceux assurant les fondements des nouvelles technologies de pointes. Les entreprises mais aussi les médias utilisent fréquemment ces allocutions sans véritablement préciser la liste exhaustive des métaux cachés derrière ces termes. Toutefois, ce type de classification ignore les autres secteurs d'utilisation de ces métaux qui sont parfois encore majoritaires. L'indium par exemple, bien qu'il rentre dans la composition des panneaux photovoltaïques à couches minces (CIGS) pourrait être classés dans les métaux verts alors que son secteur de débouché majoritaire reste encore l'électronique via la constitution d'écran plat. De la même façon, le lithium utilisé dans les batteries (Li-ion) est souvent considéré comme un métal High-tech alors que ses usages dans les verres et les céramiques mais aussi dans l'aluminium restent encore très importants. Mais encore, on oublie aussi que les technologies vertes font usage également de métaux majeurs comme le cuivre, le nickel ou le fer.

La classification du BRGM, une classification fondée sur les cycles (d)

Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) reste à ce jour l'un des seuls instituts à s'être penché de manière approfondie sur la possibilité d'une typologie économique des métaux. Le BRGM est l'organisme public français référent dans le domaine des sciences de la Terre pour la gestion des ressources et des risques du sol et du sous-sol. Leur approche plus empirique que théorique se fonde principalement sur la différenciation des métaux par

l'allure de leur cycle. L'article de Hocquart et Samama (2006) décrit 4 groupes de métaux principaux : les métaux ferreux, les métaux de base, les petits métaux et les métaux lourds. Les métaux ferreux possèdent une cyclicité molle et une croissance faible à long terme proche de la croissance du PIB. Les métaux de base ont une cyclicité accentuée et une croissance à long terme plus importante (3-5% par an) soutenue par la croissance de la production industrielle. Les petits métaux montrent une exposition aux crises aiguës souvent provoquées par des innovations généralisées à des produits de grande consommation. Pour finir, les métaux lourds connaissent une décroissance de leur usage au niveau des pays de l'OCDE. Cette classification a le mérite d'ouvrir l'horizon des typologies économiques en soulignant les moteurs des différents métaux. Toutefois, elle n'est pas dépourvue d'un manque de quantification du critère qualifiant le cycle. A partir de quel moment un métal rentre-t-il dans telle classe ou telle classe ? Elle ne qualifie pas non plus les métaux précieux bien que les auteurs les évoquent dans leur article en rapportant que « les métaux précieux ont des comportements variés ». Sous l'angle de la classification du BRGM, les métaux précieux sont donc difficilement caractérisables et sont par conséquent exclus de la typologie.

Nous pouvons regretter que les métaux lourds soient seulement envisagés au niveau des pays de l'OCDE, peut être faudrait-il aussi prendre en compte la consommation des pays émergents qui peuvent contrebalancer ce mouvement. Enfin, on reproche principalement à cette classification de discriminer les métaux seulement par leur cycle sans prendre en compte d'autres facteurs économiques.

La discrimination par le chiffre d'affaire (e)

Un autre classement économique possible consiste à séparer les métaux par l'importance de leur marché, autrement dit la valeur de leur production. Un exemple de ce type de classification peut être observé dans l'ouvrage de Laznicka (2010, p.8). Il identifie ainsi cinq catégories : les métaux fondamentaux (plus de 10G\$), les métaux très importants (plus d'un milliard de dollars), les métaux importants (100 M\$ ou plus), les métaux mineurs ou spéciaux (plus de 10M\$), les métaux très mineurs (moins de 10M\$).

Cette classification est une première approche économique mais elle n'est pas non plus dénuée d'inconvénients. A titre d'exemple, on agglomère l'or, le cuivre et le fer qui n'ont pas le même comportement économique et qui n'assurent pas le même rôle dans l'économie. Au contraire on sépare, le niobium de l'indium qui pourtant ne doivent pas être si différents en termes de comportement économique.

2.4 Les typologies de nature stratégique

Métaux stratégiques et métaux non stratégiques (a)

Les métaux comme d'autres matières premières dépendent aussi de motifs militaires stratégiques. Certains métaux sont ainsi associés à des usages militaires et assurent des fonctions capitales. On pense à certaines terres rares comme le samarium et le néodyme indispensables aux systèmes de guidage missile. Quand ces éléments s'avèrent difficilement substituables et qu'ils cumulent en plus des risques de ruptures d'approvisionnement du fait de l'absence de production nationale, on les classe comme stratégiques. Les Etats-Unis ont l'habitude de discriminer les éléments de cette manière afin de mettre en lumière les faiblesses de la force militaire américaine (voir en particulier le rapport du NRC et du NDS⁶). L'usage de ce genre de classification peut être la constitution de stocks stratégiques ou de partenariats privilégiés avec certains pays producteurs.

Métaux critiques et métaux non critiques (b)

Contrairement à ce qu'on pourrait croire la criticité d'un métal n'est pas tout à fait identique à son caractère stratégique. La méthodologie est globalement la même, mais on évalue dans cette classification l'importance d'un métal par sa place dans la chaîne de valeur de l'économie nationale, d'un secteur, ou d'une entreprise et non plus dans les applications militaires. On détermine ensuite le risque de rupture d'approvisionnement du métal par divers critères (concentration de la production, stabilité politique du pays...). Un métal réunissant à la fois un risque de rupture d'approvisionnement élevé et une place capitale dans la chaîne de valeur de l'économie est considéré comme critique. L'Europe et le Japon ont davantage recours à ce type d'évaluation⁷ bien que les Etats-Unis via le département de l'énergie américain adoptent aussi cette démarche⁸. Il faut noter que certains pays comme la France et l'Angleterre⁹ ont décidé de doubler l'existence d'une stratégie supranationale par une stratégie

⁶ Voir le rapport du National Research Council: *Managing Materials for a Twenty-first Century Military* et le rapport du National Defense Stockpile: *Reconfiguration of the National Defense Stockpile Report to Congress*.

⁷ Voir le rapport de la commission européenne, *critical raw materials for the UE* : http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b_en.pdf et les différents rapports sur les métaux critiques du NEDO au Japon : <http://www.nedo.go.jp/english/index.html>.

⁸ Rapport du département de l'énergie américain (DOE), *critical materials strategy* : <http://energy.gov/sites/prod/files/edg/news/documents/criticalmaterialsstrategy.pdf>

⁹ Pour en savoir plus, consulter le rapport du Sénat qui rend compte de la création du comité pour les métaux stratégiques (COMES) : <http://www.senat.fr/rap/r10-782/r10-782.html> et la réponse stratégique anglaise : <http://www.parliament.uk/business/committees/committees-a-z/commons-select/science-and-technology-committee/inquiries/strategically-important-metals/>

également nationale sur les métaux. La création de ce type de catégorie est relativement récente sûrement cantonné au XXIème siècle.

2.5 Conclusion sur les typologies disponibles

Il n'existe pas de meilleure classification en soi, la pertinence d'une typologie dépend de l'objet de l'étude. Plusieurs critiques peuvent cependant être adressées aux classifications actuelles, ces faiblesses sont rassemblées en trois points principaux :

- La faible présence de critères économiques ou dans des circonstances particulières qui ne font rejaillir qu'une partie des sous-jacents économiques de l'économie des métaux.
- La focalisation des classifications sur un critère particulier qui aboutit à une classification du type doté ou non doté du critère (binaire) qui ne rend pas compte d'une réalité plus complexe. Avec cette hiérarchie on souligne évidemment un groupe aux caractéristiques homogènes mais on forme en parallèle un groupe totalement hétérogène. Cela peut conduire à des interprétations erronées lorsqu'on évoque ce groupe hétérogène, d'autant plus si on souhaite établir des conclusions ayant trait à l'économie des métaux.
- Le faible nombre de critères et surtout le choix des critères en fonction de l'objet d'étude biaisent les résultats en faveur de la réalité empirique constatée.

Tandis que nous pouvons corriger les deux premières faiblesses des typologies existantes, la troisième plus difficile à appréhender pourrait demeurer.

3 Evaluation d'une typologie économique via l'ACP et le CAH

3.1 Les critères pour une nouvelle classification économique des métaux

La réalité économique des métaux est complexe, par conséquent nous feront usage de plusieurs variables pour correctement refléter cet état. Toutefois, les marchés des métaux sont loin d'être parfait et l'asymétrie d'information reste la règle sur la plupart des marchés. Or, un critère de discrimination se doit d'être accessible, ce qui limite le champ des indicateurs aux données publiques et disponibles. Notre étude est un compromis entre un nombre de variables et d'individus raisonnables compte tenu de l'information disponible.

Nous avons choisi huit variables principales caractérisant l'usage économique de ces variables. Le choix de ces variables fut orienté dans l'atteinte de deux objectifs principaux : les données pour ces variables sont représentatives de l'activité économique relative aux métaux et elles permettent de discriminer les métaux entre eux.

- Le niveau de production en tonnes (nommé **Prod**)
- Le prix (nommé **Px**) par unité de masse (le kg). Cette variable représente une perception de la rareté subjective de la ressource.
- La concentration moyenne dans la croûte terrestre, exprimée en kg par kg (nommée **Concentration**). Cet indicateur nous permet d'identifier la rareté géologique objective d'un métal.
- Le niveau de recyclage à partir des produits en fin de vie est un indicateur nous permettant d'évaluer la présence d'une filière de recyclage en aval du processus de consommation du métal (nommé **Recyclage**).
- Le degré de concentration de la production géographique capté par la somme des parts des cinq premiers pays producteurs élevées au carré, nommé **HHI5** car il repose sur une construction quasi-similaire à l'indice de Herfindahl–Hirschman.
- Le type de production technique principal (produit primaire, coproduit, sous-produit), codé un lorsque la majeure production du métal est effectué en sous-produit (nommée **Sproduit**) et zéro dans les autres situations.
- La volatilité de la production, captée par l'écart type des taux de variation annuels de production sur les vingt dernières années (nommée **Volprod**).
- La volatilité du prix, calculée par l'écart type des taux de variation annuels du prix constant sur les vingt dernières années (nommée **Volprix**).

D'autres critères auraient pu intégrer cette étude mais l'absence de données les a rendus inéligibles :

- Le degré de concentration des entreprises.
- Les débouchés principaux du métal par secteur.
- Le degré de concentration des consommateurs et leur répartition géographique.
- Le temps de vie statique estimée des réserves prouvée.
- Le volume des stocks.
- Le profil de l'intensité d'utilisation dans les pays émergents et dans les pays industrialisés.

Au contraire, d'autres variables ont été écartées car elle ne permettent pas de discerner des classes de métaux particuliers et n'apportent pas d'information pour une typologie :

- La croissance moyenne géométrique de la production du métal sur les vingt dernières années.

- L'instabilité de la gouvernance des pays producteurs exprimé par le produit du HHI et de l'inverse du *Worldwide Governance Indicators* fournis par la banque mondiale.
- La taille du marché (en millions de dollars) évalué par la valeur du chiffre d'affaire mondial généré par la vente du métal.

3.2 Les données

Pour établir une classification des métaux nous effectuons une analyse exploratoire des données fondée sur un échantillon de 43 métaux différents sur une population totale d'un peu plus de soixante métaux. Certains métaux dont les marchés sont totalement opaques n'ont pu être intégrés dans l'ACP faute de données sur l'ensemble des variables, c'est le cas de certaines terres rares mais également de plusieurs métaux précieux comme des métaux du groupe des platinoïdes.

Avant d'aborder la méthode de l'ACP, nous effectuons une analyse des statistiques univariées afin de dégager quelques traits notables de l'activité économique des métaux. En effet, certaines statistiques sont largement dominées par quelques métaux. Ainsi la production de fer dépassant le milliard de tonne représente près de 90% du tonnage total des métaux extraits et encore quasiment 20% du chiffre d'affaire total des métaux. D'autres métaux comme le cuivre, l'aluminium, le titane et l'or possèdent également des marchés aux valeurs très élevées (Figure 1-2). Sans surprise, certains de ces métaux constituent l'essentiel du contenu en métal de notre croûte terrestre. Ainsi l'aluminium (48%), le fer (33%), et le magnésium (13%) forment 95% de l'abondance en métaux présente en moyenne sous nos pieds. Il faut d'ailleurs remarquer que ces métaux sont souvent désignés comme les éléments de l'espoir en cas d'épuisement des autres métaux (Brobst, 1979 ; Diederer, 2010). Ces trois métaux font partie des dix éléments les plus courants de la croûte terrestre groupant eux même plus de 99% de la masse totale.

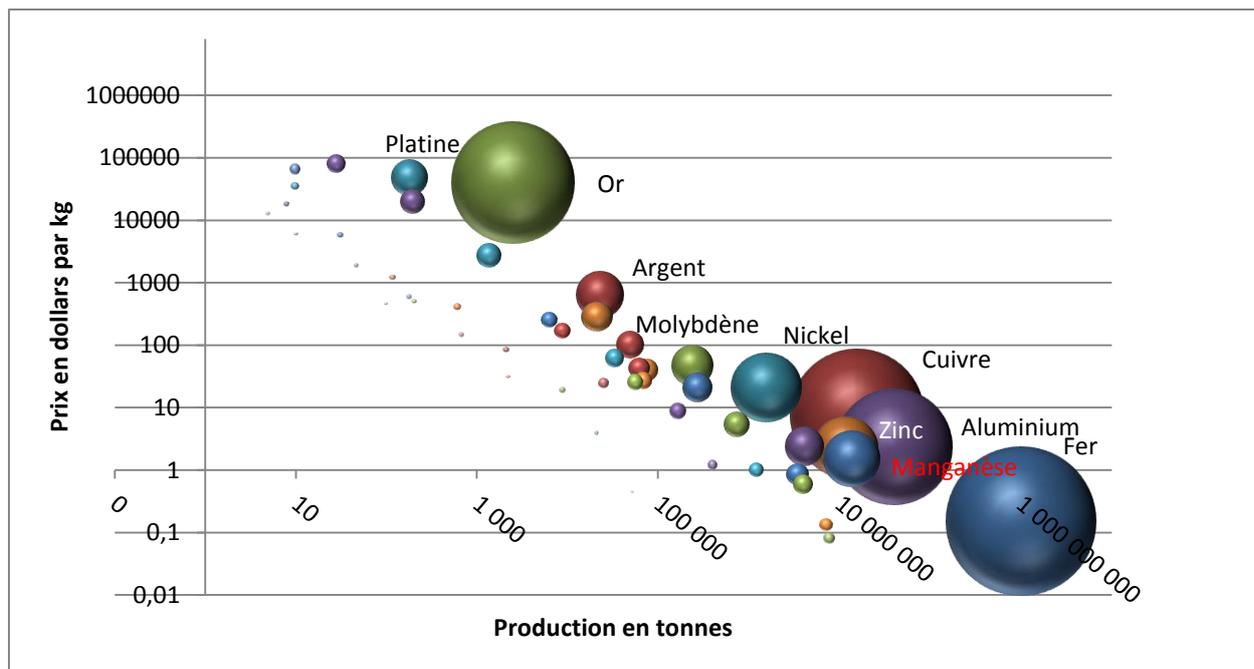


Figure 1-2 Principaux marchés des métaux et répartition des métaux selon leur prix et leur production. Source : auteur

La concentration géographique de la production est aussi très marquée avec une part prédominante de quelques pays. La Chine occupe dans plus de 60% des cas la place de premier producteur mondial. Si elle ne domine pas la production d'un métal, elle est au moins présente dans les quatre premiers producteurs mondiaux du métal étudié dans 92% des cas (Figure 1-3). Les autres grands producteurs de métaux représentent majoritairement des pays dont la superficie géographique est très importante (Russie, Etats-Unis, Australie, Canada, Kazakhstan). L'instabilité de la gouvernance n'apparaît pas comme un train commun aux grands producteurs de métaux, cet indicateur atteignant des niveaux assez divers selon les pays (Figure 1-4). Du côté des métaux, la concentration de l'indice HHI5 oscille entre 390 pour l'or et 9409 pour cinq terres rares. La moyenne pour cette indicateur s'établit à 3914 avec un écart type de 2830. Tous les métaux ne sont donc pas nécessairement très concentrés géographiquement mais la nature de la production des métaux demeure relativement oligopolistique. Parfois, cette production géographique oligopolistique peut s'avérer problématique si elle se double d'un faible état de gouvernance des pays en question comme c'est le cas pour les terres rares ou le platine.

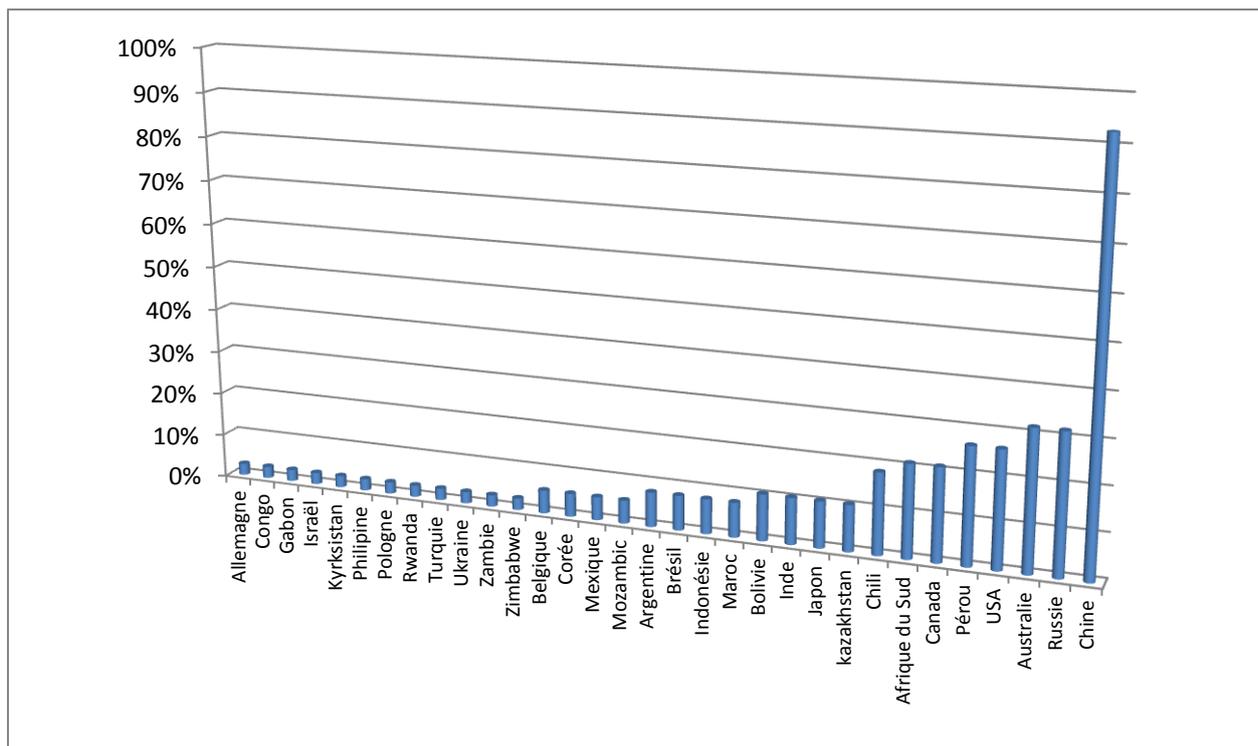


Figure 1-3 Présence des pays dans les 4 premiers producteurs mondiaux du panel de métaux étudiés. Source : données USGS, calculs de l'auteur

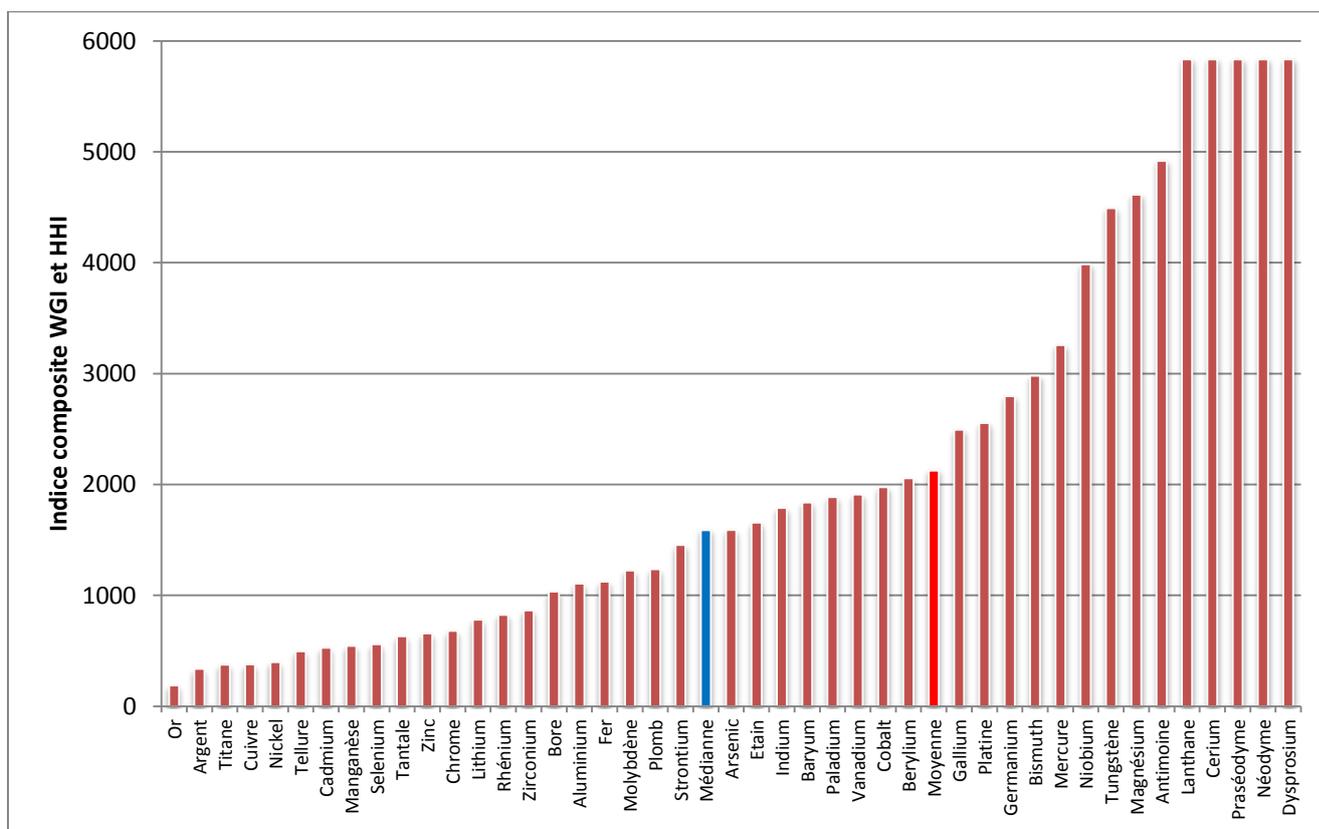


Figure 1-4 Métaux les plus sensibles d'un point de vue géopolitique, indice composite WGI et HHI. Source : données USGS et Banque mondiale, Calculs de l'auteur

3.3 La méthode l'Analyse en Composantes Principales

L'ACP est une méthode qui permet de résumer l'information statistique. Cette méthode fut évoquée pour la première fois par Karl Pearson (1901) mais doit sa généralisation à Harold Hotelling (1933). Elle nous permet de réaliser une analyse exploratoire des données. L'ACP consiste d'après Saporta (2006, p.162-169) :

« à obtenir une représentation approchée du nuage des n individus (ici les métaux) dans un sous espace de dimension faible (plus faible que le nombre de variables) [...] L'ACP construit de nouvelles variables artificielles et fournit des représentations graphiques permettant de visualiser les relations entre variables ainsi que l'existence éventuelle de groupes d'individus et de groupes de variables ¹⁰».

3.4 Transformation des données et analyse des résultats

La réussite de l'ACP tient à la présence de corrélations multiples entre les variables.

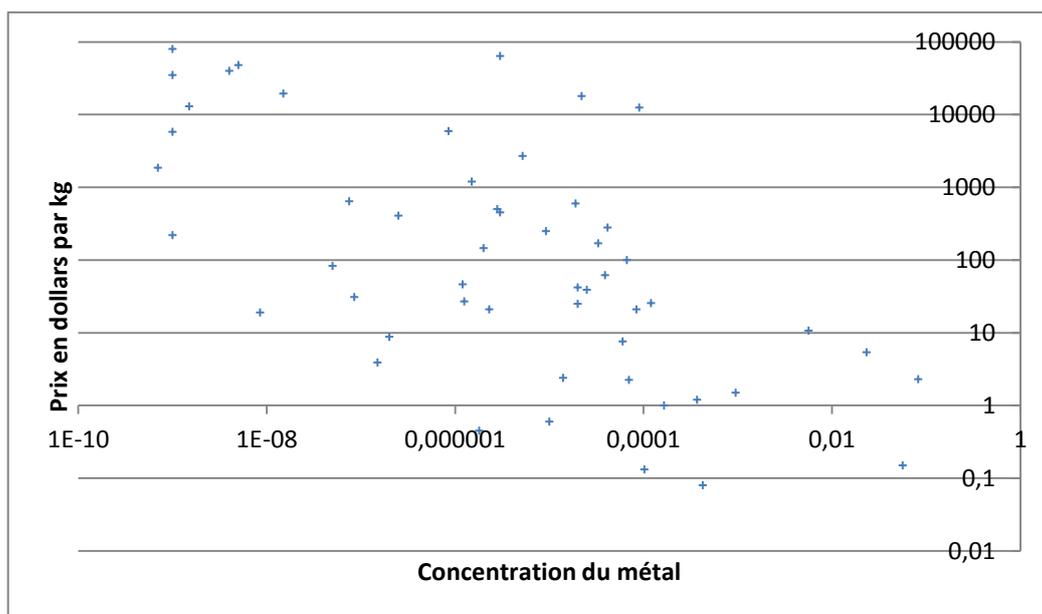


Figure 1-5 Relation non linéaire entre le prix par unité de masse et la concentration dans la croûte terrestre. Source : calculs de l'auteur

Or, comme on l'observe dans la Figure 1-5, le lien entre le prix et la concentration moyenne dans la croûte terrestre n'est pas aléatoire mais n'obéit pas non plus à un schéma linéaire. En effet, on peut légitimement penser qu'il existe une forte corrélation entre le prix qui exprime la rareté subjective perçue par les agents économiques et la concentration moyenne dans la croûte terrestre qui dévoile une rareté géologique. Une relation linéaire signifierait que la

¹⁰ Les parenthèses ont été ajoutées par l'auteur.

rareté économique d'un élément entretient une relation strictement proportionnelle à la rareté géologique de l'élément exprimée ici par sa concentration dans la croûte terrestre. Or le coût des inputs pour extraire un métal évolue suivant une relation inverse avec la concentration du métal dans le minerai, il n'y a donc pas de raison que le prix qui inclut ce coût progresse linéairement. Pour capter correctement cette relation de type puissance, nous passons en logarithme les variables qui présenteraient des évolutions non linéaires (Voir Annexes 1.1). La présence de logarithme est signalé par la présence d'un « l » devant le nom de la variable. Nous avons également normé les variables via des données centrées-réduites pour éviter une influence de l'unité de mesure.

Avant d'aborder les résultats de l'ACP, il peut être intéressant de se pencher sur l'un des principaux inputs de cette méthode, la matrice de corrélation entre les différentes variables.

La matrice des corrélations est une matrice symétrique qui présente les corrélations entre chacune des variables deux à deux (Figure 1-6). Le coefficient de corrélation est calculé selon la méthode Pearson, autrement dit le rapport de la covariance entre les deux variables et le produit des écarts types des deux variables.

	<i>lconcentration</i>	<i>lpx</i>	<i>lprod</i>	<i>lHHI3</i>	<i>Recyclage</i>	<i>Volprod</i>	<i>lVolprix</i>	<i>Sproduit</i>
<i>lconcentration</i>	1							
<i>lpx</i>	-0,66	1						
<i>lprod</i>	0,75	-0,83	1					
<i>lHHI3</i>	-0,12	0,23	-0,37	1				
<i>Recyclage</i>	0,24	-0,09	0,49	-0,52	1			
<i>Volprod</i>	-0,17	0,14	-0,52	0,40	-0,54	1		
<i>lVolprix</i>	-0,23	0,26	-0,36	0,34	-0,34	0,21	1	
<i>Sproduit</i>	-0,44	0,11	-0,51	0,27	-0,52	0,54	0,04	1

Figure 1-6 Matrice des corrélations entre les variables. Source : calculs de l'auteur

La taille de notre échantillon s'élève à 43, c'est-à-dire le nombre de métaux pour lesquels nous possédons des données pour l'ensemble des 9 variables étudiées. Les coefficients de corrélation surlignés en rouge désignent les relations statistiquement significatives pour un risque de première espèce de 5%¹¹. De nombreuses variables semblent être fortement corrélées avec des coefficients dépassant 0,5 en valeur absolue et allant jusqu'à 0,83. Toutefois ces niveaux de corrélation bien qu'élevés nous assurent aussi que les variables apportent toutes de l'information car nous n'avons pas de variables quasi parfaitement corrélées entre elles.

¹¹ La valeur critique est tirée d'une table des valeurs critiques du coefficient de corrélation de Pearson disponible dans Saporta (2006, p.575).

Il existe deux situations extrêmes où la réalisation d'une ACP est déconseillée. Une première situation correspondrait à l'introduction de variables parfaitement décorréelées entre elles. Ceci implique que chacune fournit de l'information non redondante, on ne peut donc pas réduire cette information. Lorsque ce type de situation existe, le déterminant de la matrice des corrélations est égal à 1, autrement dit la matrice est identique à la matrice identité. Le rejet du test de sphéricité de Bartlett qui pose comme hypothèse que la matrice est une matrice identité nous permet d'écarter cette hypothèse. Un second cas extrême conduirait à l'apport de variables n'apportant aucune information. Une variable résultant d'une combinaison linéaire de deux autres par exemple. Dans ce cas, le déterminant de la matrice est nul et la matrice est singulière. Pour éviter ce genre de situation, Field (2000, p.445) recommande de ne pas entreprendre des ACP sur des données dont la matrice des corrélations possède un déterminant inférieur à 10^{-5} afin de prévenir l'usage d'une matrice mal conditionnée. Nous avons également exclu la variable taille de marché (produit du prix et de la production) car si celle-ci n'est pas une combinaison linéaire des deux variables, l'usage de cette variable conduit à une matrice des corrélations non définie positive avec un déterminant négatif et une valeur propre négative, empêchant ainsi toute possibilité d'ACP.

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		,578
Bartlett's Test of Sphericity	Approx. Chi-Square	212,597
	df	28
	Sig.	,000

Figure 1-7 Résultat du test KMO et de sphéricité de Bartlett réalisé sous SPSS. Source : *calculs de l'auteur*

La mesure du KMO est acceptable (0,578) même si elle est relativement faible (Figure 1-7). Cette faiblesse s'explique par des mesures d'adéquacité de l'échantillonnage de Kaiser-Meyer-Olkin (MSA) assez différentes selon les variables (Figure 1-8).

Le prix devrait être écarté de l'ACP car sa MSA est inférieur à 0,5, toutefois compte tenu de l'importance capitale du prix notamment dans la discrimination des métaux précieux, nous décidons de conserver cette variable.

Variable	MSA
Concentration géologique	0,737
Prix	0,424
Production	0,539
HHI	0,69
Recyclage	0,61
Volatilité de la production	0,549
Volatilité du prix	0,701
Sous produit	0,642

Figure 1-8 Mesures d'adéquacité de l'échantillonnage de Kaiser-Meyer-Olkin. Source : *calculs de l'auteur*

1.1 Analyse des résultats obtenus à partir d'une analyse en composantes principales.

L'un des premières choses à faire pour évaluer la représentation pertinente de l'ACP est d'observer le tableau des valeurs propres et le pourcentage d'inertie expliqué par chacune (Tableau 1-1).

Plus le pourcentage de la variance expliquée par la variance est important sur les premières composantes, meilleure est la qualité de la projection des individus dans un espace de faible dimension.

	Valeur propre	% de la variance	% cumulée de la variance
comp 1	3,65	45,68	45,68
comp 2	1,54	19,25	64,93
comp 3	1,08	13,53	78,45
comp 4	0,62	7,69	86,15
comp 5	0,52	6,44	92,59
comp 6	0,36	4,51	97,10
comp 7	0,20	2,55	99,65
comp 8	0,03	0,35	100

Tableau 1-1 Pourcentage de la variance exprimé par les composantes principales. Source : *calculs de l'auteur*

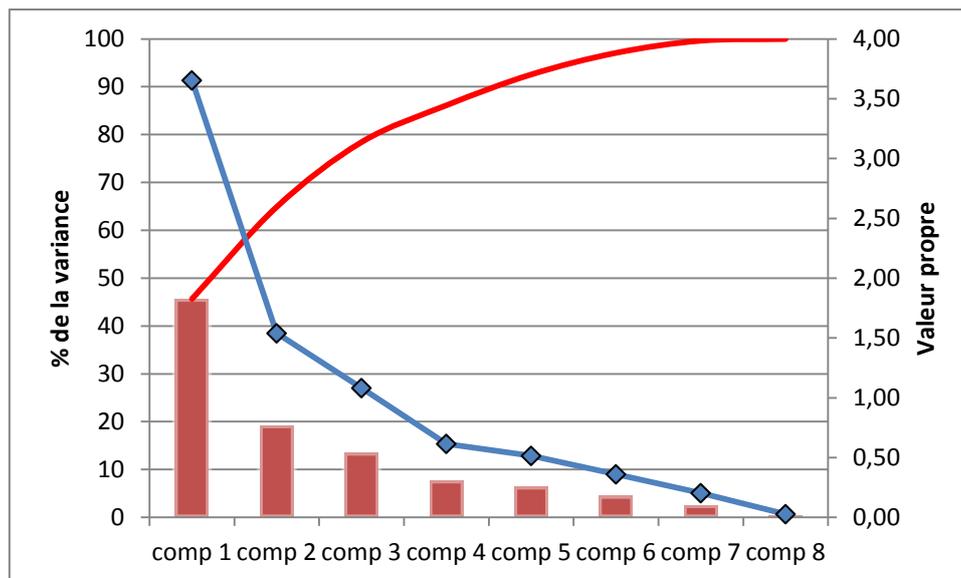


Figure 1-9 Représentation graphique des valeurs propres et du pourcentage cumulé croissant de la variance. Source : calculs de l'auteur

L'ACP apparaît comme satisfaisante car les valeurs propres décroissent très rapidement à partir de la deuxième composante (Figure 1-9). Les deux premières composantes expriment 65% de la variance et les trois premières composantes 78%.

Attachons-nous maintenant à l'observation des deux premières composantes qui résument à elles seules 65% de l'information. La contribution des variables à la formation des trois premières composantes principales est fournie en annexes. Les variables sont assez bien représentées sur les deux premières composantes principales (Figure 1-10) car leurs vecteurs tendent vers le cercle unité¹². Une seconde observation immédiate consiste à valider des corrélations assez claires entre les variables. En effet, les vecteurs de représentation des variables sur les composantes principales sont quasiment parallèles, opposés ou orthogonaux. Nous pouvons dégager deux principales oppositions :

- Une opposition entre les métaux produits en grandes quantités et présents en abondance dans la croûte terrestre et les métaux onéreux. D'un point de vue empirique, on oppose les métaux à échelle de production industrielle comme le fer, le cuivre, ou l'aluminium aux métaux précieux.
- La seconde opposition différencie les métaux dont les marchés sont importants et qui bénéficie d'un recyclage élevé d'autres métaux au contraire volatiles (en termes de

¹² Nous pouvons aussi évaluer cette bonne représentation de la projection grâce aux cosinus carrés des variables.

production), concentrés géographiquement et souvent exploités en sous-produit. Dans la réalité, c'est séparer les petits métaux des autres métaux.

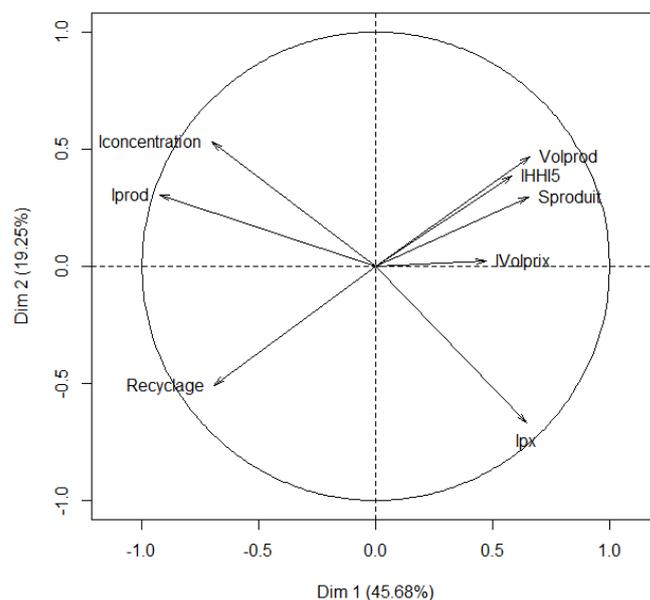


Figure 1-10 Représentation des corrélations entre les variables et les composantes principales. Source : *calculs de l'auteur*

La quasi-orthogonalité des deux vecteurs d'opposition signifie que les deux oppositions sont indépendantes. Ainsi les métaux extraits en sous-produit ne sont pas en moyenne ni plus ni moins onéreux que les autres métaux de l'échantillon.

Nous pouvons ensuite examiner le placement des métaux sur ces axes (Figure 1-11). Nous remarquons qu'il se forme des groupes assez distincts même si il subsiste certains outsiders dont nous pourrions expliquer la raison par la suite.

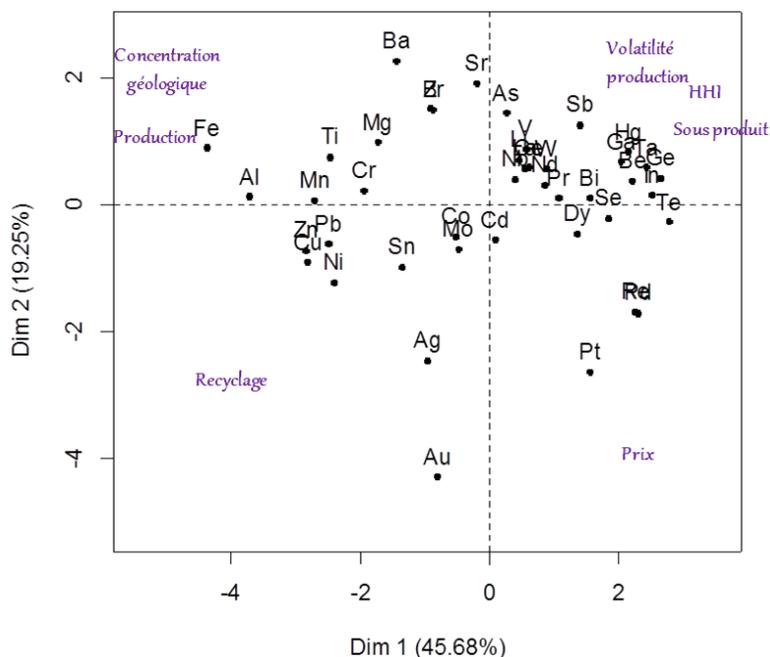


Figure 1-11 Représentation des métaux sur les deux premiers axes. Source : calculs de l'auteur

Afin de compléter cette analyse, nous pouvons aussi considérer l'intégration de la troisième composante principale qui représente encore 10% de la variance. Le troisième axe apporte surtout une quantification de la volatilité du prix des métaux, celui-ci amenant à lui seul, 50% et 30% de la variabilité des variables volatilité du prix et concentration géographique respectivement (Figure 1-13 et Figure 1-14).

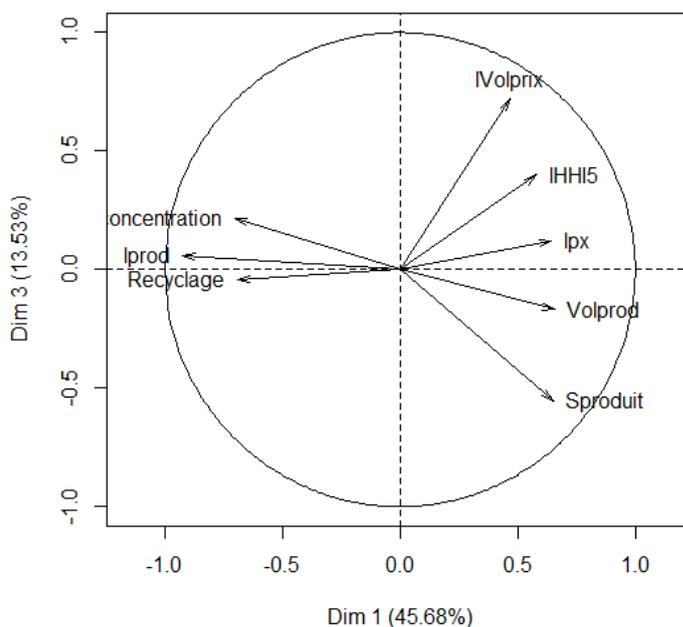


Figure 1-12 Représentation des corrélations entre les variables et les composantes 1 et 3. Source : calculs de l'auteur

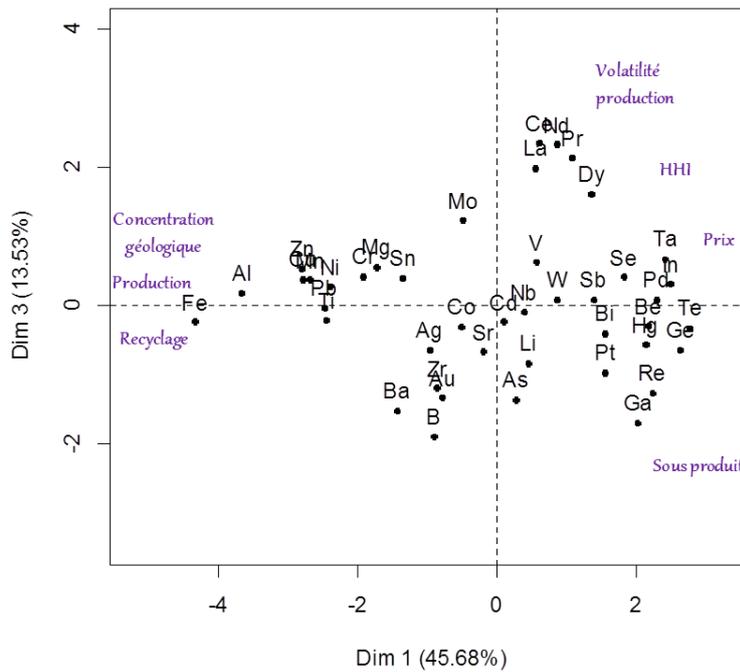


Figure 1-13 Représentation des métaux sur la première et troisième composante principale. Source : calculs de l'auteur

3.5 Détermination de classes par la classification ascendante hiérarchique

La seconde étape consiste à définir des groupes par des méthodes statistiques grâce à leurs ressemblances et dissemblances. Deux grandes familles de méthodes existent, les procédures de classement et les procédures de classification. Comme l'évoque Lebart et al. (2006) : « les méthodes de classification sont des méthodes d'apprentissage non supervisé alors que les méthodes de classement relèvent de l'apprentissage supervisé ». Comme il n'existe pas de classe à priori, nous utilisons une méthode de classification non supervisée. Nous souhaitons ainsi identifier des « clusters » de métaux. Nous avons recours pour cela à la classification ascendante hiérarchique (CAH). Il est difficile d'attribuer la parenté de cette méthode à un auteur en particulier mais nous pouvons désigner quelques auteurs comme des précurseurs (Sokal et Sneath, 1963 ; Lance et Williams, 1967). La méthode de la CAH agit de sorte à regrouper les métaux qui se ressemblent le plus, puis en diminuant le degré de précision, on en vient à regrouper des métaux plus dissemblables. Ce niveau de dissemblance est exprimé par la distance euclidienne. Plus la distance euclidienne moyenne entre les membres du groupe est forte, plus la classe a tendance à être hétérogène. Pour correctement répondre à l'enjeu de la classification, il s'agit donc de choisir un nombre de classe suffisamment élevé pour ne pas souffrir des mêmes maux que les typologies existantes tout en ne dépassant pas un certain seuil qui conduirait à créer des groupes peu pertinents et à perdre une vue globale sur les métaux possédant les mêmes fondamentaux. Le choix du nombre de classe à partir de

la CAH revient à concilier maximisation de l'inertie interclasse et minimisation de l'inertie intraclasse.

Souvent le niveau correct de découpage des individus en classe est appréhendé par le dendrogramme (Figure 1-14). Il représente l'ordre successif d'agrégation des individus par classes de moins en moins homogènes en partant du bas vers le haut. Parallèlement il permet la lecture du niveau de l'indice de « dissemblance » des individus de deux classes différentes réunies ensemble. Le niveau de l'inertie intra-classe est aussi une autre interprétation de l'indice de dissemblance.

Il existe plusieurs possibilités de niveau de découpage pertinent, mais pour éviter les déficiences des typologies existantes trop centrées sur des analyses dichotomiques, nous choisissons délibérément un niveau de séparation supérieur à 2 classes. A l'opposé un découpage trop prononcé rendra difficile l'interprétation des classes. D'un point de vue statistique, l'optimalité consiste à retenir le nombre de classe qui fait apparaître le premier saut important de l'indice de dissemblance, ici le logiciel a retenu 5 classes. L'observation du dendrogramme semble conforter ce choix de classification car une séparation plus poussée n'aboutirait pas à un saut significatif de l'indice de dissemblance. On peut également retenir trois classes si on souhaite une classification plus agrégée car cette classification fait apparaître un second saut de l'indice de dissemblance (Figure 1-17 et Figure 1-18). En effet pour un niveau d'inertie intra-classe de 0,35, nous distinguons 6 classes. L'inertie intra-classe monte ensuite à 0,7 pour 5 classes, 0,8 pour 4 classes, 1 pour 3 classes et 2,4 pour 2 classes (Figure 1-15).

La forme du dendrogramme est assez évocatrice dans la mesure où il fournit des informations pertinentes sur la manière dont les métaux se ressemblent ou au contraire se distinguent. Ainsi la séparation la plus marquée consiste à scinder les métaux majeurs (fer, aluminium, cuivre...) des autres métaux principalement via le critère de la production. Dans un second temps, le groupe des autres métaux fait apparaître un sous groupe particulier, les métaux précieux (or, argent et platinoïdes) grâce à leur valorisation très supérieure à la moyenne. Les métaux restants correspondent à ce qu'on appelle les métaux mineurs eux-mêmes pouvant être divisés en trois sous classes : les terres rares, les métaux mineurs issus principalement de résidus miniers et les métaux mineurs issus en sous-produit de raffinage des métaux majeurs. Les terres rares représente une sous classe particulière des métaux mineurs car elles détiennent une concentration géographique de la production hors norme, et relève également davantage

d'une exploitation en coproduit que d'une extraction en sous-produit comme la majeure partie des autres métaux mineurs.

Hierarchical Clustering

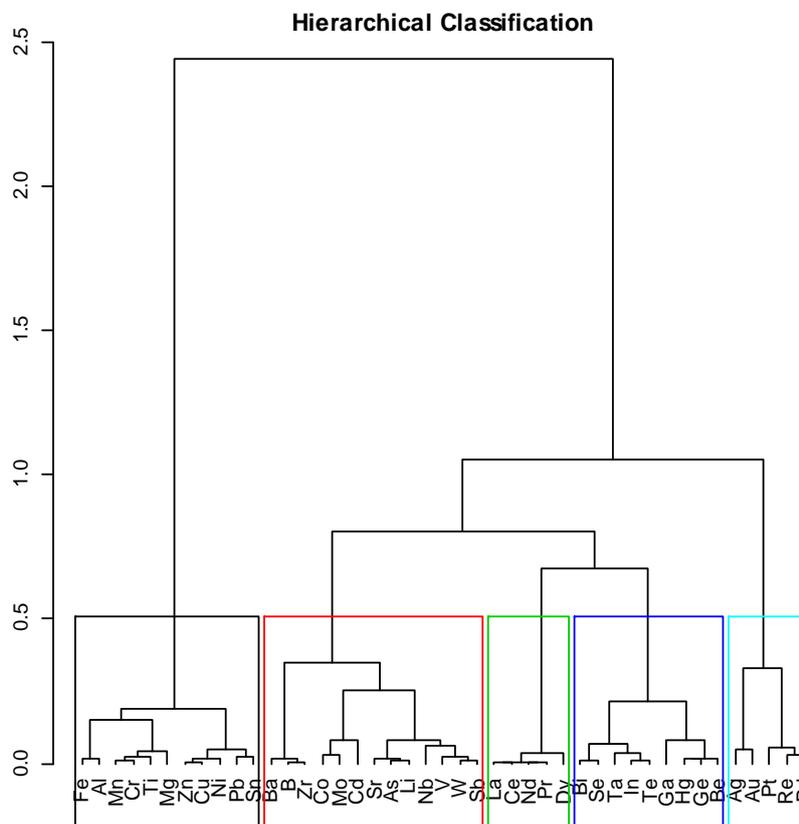


Figure 1-14 Dendrogramme formé par la CAH sur les individus de l'échantillon. Source : calculs de l'auteur

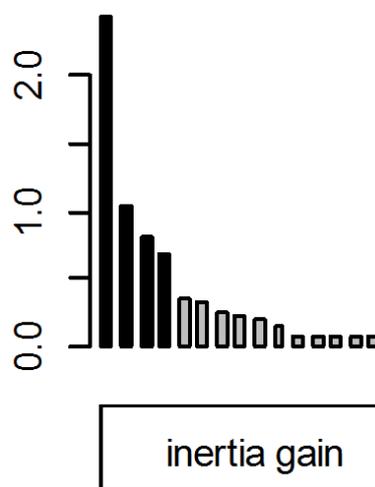


Figure 1-15 Evolution de l'inertie intra-classe selon le nombre de classes choisies. Source : calculs de l'auteur

Pour un aperçu plus rapide, les résultats des variables discriminantes des groupes de la CAH sont exprimés sur un graphique (Figure 1-16). Ces valeurs doivent être perçues comme les caractéristiques principales des sous-groupes. Autrement dit plus la valeur absolue de la statistique d'un groupe attachée à une variable est importante, plus les métaux de ce groupe détiennent une valeur de cette variable très différente de la moyenne générale des métaux. Ainsi, les métaux du groupe des métaux majeurs ont en général des productions largement supérieures à la moyenne des métaux. Au contraire, leur extraction suit principalement une logique d'exploitation en tant que produit primaire, ce qui explique une valeur très fortement négative pour la variable sous-produit. La discrimination du groupe des métaux précieux fut permise principalement par le niveau de prix des métaux formant cette classe. Il ne s'agit donc pas de caractériser ce groupe par la concentration géographique de leur production par exemple.

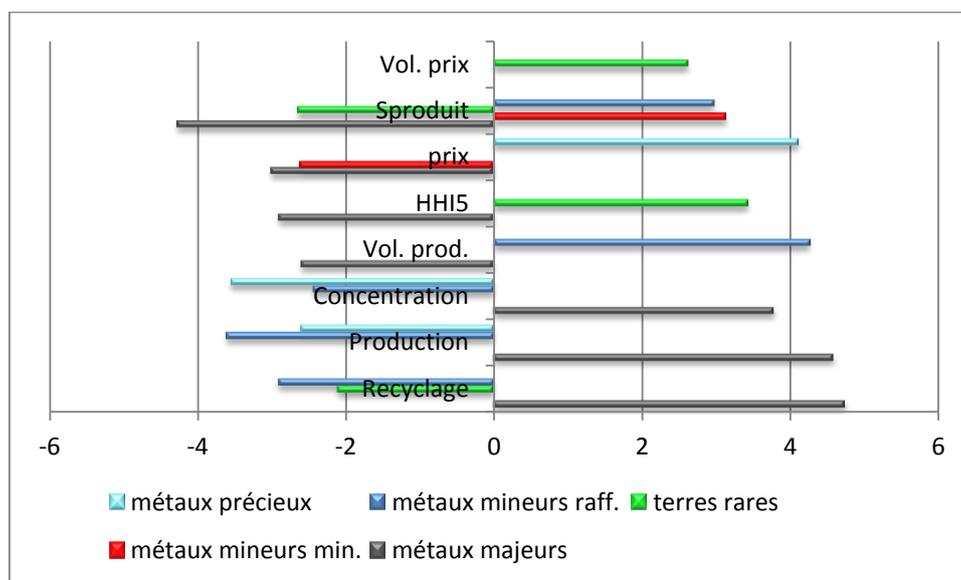


Figure 1-16 Représentation des caractéristiques générales des 5 sous-groupes de la CAH. Source : calculs de l'auteur

La méthode de classification n'est cependant pas parfaite, car on peut légitimement estimer certains métaux mal classés. Certains métaux en bordure de classe comme le cobalt et le molybdène sont à quasi équidistance de deux centres de classe. Il suffirait que leurs statistiques soient appréhendées de façon trop approximative pour qu'une faible correction les basculent dans un autre groupe. Ces cas limites peuvent aussi résulter d'une transition dans l'usage de certains métaux. Dans le cas du cobalt et du molybdène par exemple, l'évolution de leur usage les pousse petit à petit vers les métaux majeurs, ce qui s'est traduit récemment par leur entrée en cotation au London Metal Exchange. Leurs marchés regroupent suffisamment d'acteurs et génèrent assez de valeur pour justifier la création d'un marché organisé.

D'une façon identique le rhénium apparaît à égal distance entre les métaux précieux et les métaux rares. Son prix bien que plus élevé que certains métaux précieux comme l'argent n'atteint pas encore la valorisation de certains métaux rares comme le dysprosium. Mais c'est surtout la taille de marché très restreinte du Rhénium (88M\$) qui l'identifie davantage aux métaux mineurs qu'aux métaux précieux (entre 4 et 100G\$).

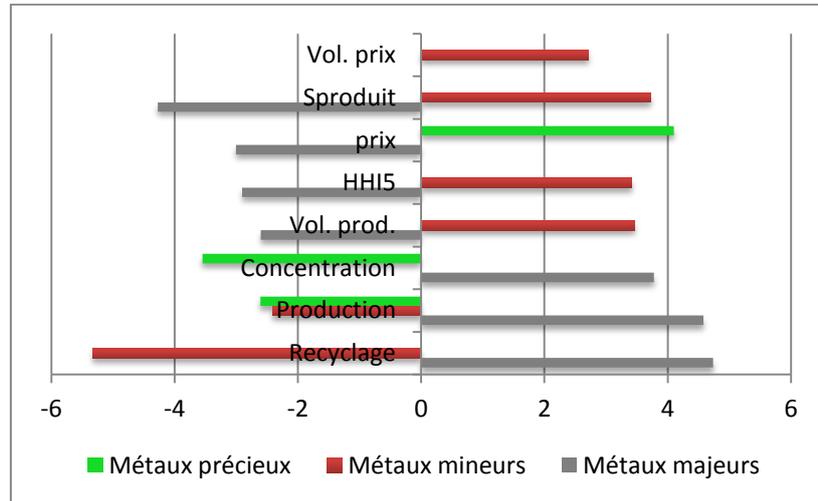


Figure 1-17 Représentation des caractéristiques générales des 3 sous groupe de la CAH. Source : calculs de l'auteur

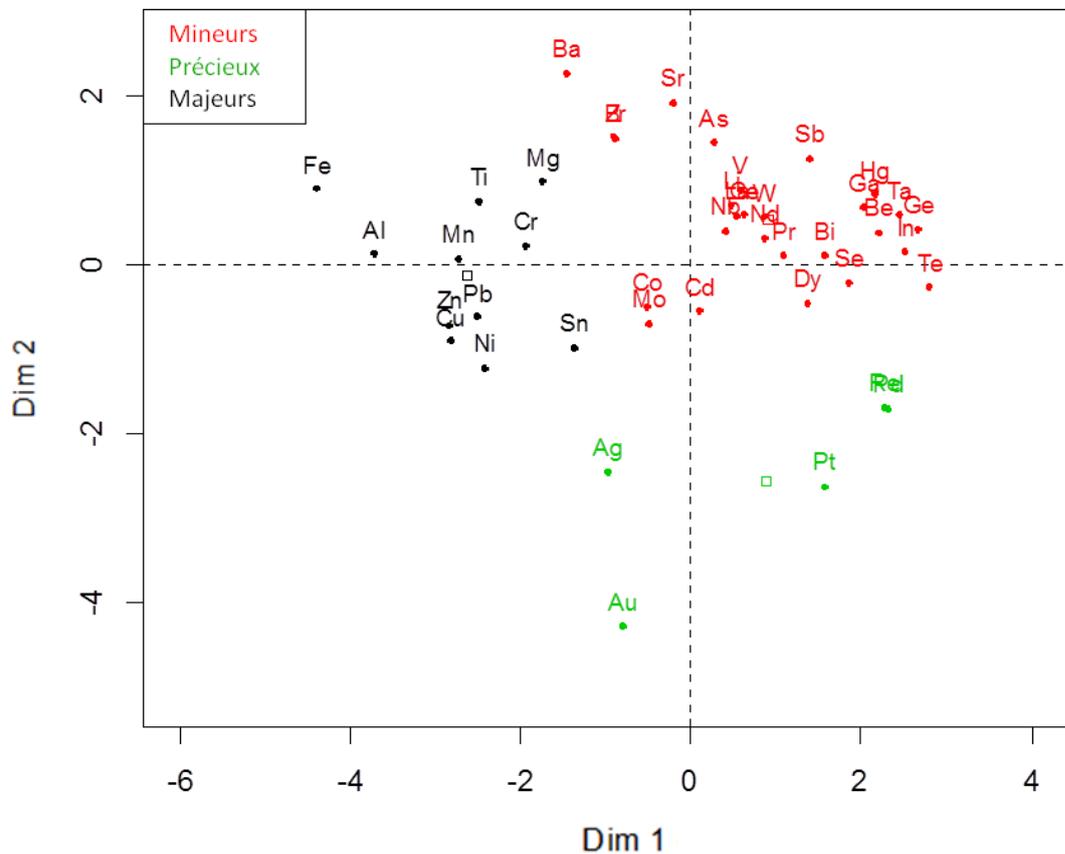


Figure 1-18 Classification hiérarchique ascendante en 3 classes. Source : calculs de l'auteur

4 Fondamentaux économiques sous jacents

4.1 *Sous jacents économiques des différentes classes de métaux*

Nous proposons la création de trois nouvelles classes économiques de métaux attachées à des fondamentaux distincts :

- **Les métaux majeurs** incluent un ensemble de métaux qui constituent les fondements de nos économies (métaux de base et métaux ferreux). Ces métaux sont caractérisés par une concentration géologique élevée qui facilitent leur extraction en très grandes quantités, souvent en produit primaire. Ces quantités colossales produites (jusqu'au milliard de tonnes) en font des métaux abondants qui se négocient à des prix relativement faibles comparés aux autres métaux (inférieurs à 50\$/kg), même si leur valeur a pu remonter ces dernières années suite aux supercycles soutenus par les économies émergentes. Leur recyclage ne pose pas de problème car ils constituent l'essentiel des éléments à recycler en termes de masse. Leur production et leur prix sont fortement pro-cycliques. Le cuivre est par exemple un très bon proxy de l'état de l'économie et de la croissance. La croissance de ces marchés est en général relativement stable ou varie très peu d'une année sur l'autre du fait de la diversification de leurs débouchés.
- **Les métaux précieux** regroupent les métaux dont l'usage bien que capital à beaucoup de secteurs sont utilisés avec parcimonie du fait de leur haute valeur économique. Ils sont très faiblement concentrés dans la croûte terrestre comme l'illustre l'or (0,001ppm¹³), ce qui explique leur prix. Les métaux précieux sont l'exemple de produits ayant à la fois une haute valeur d'usage et d'échange. Même si il est plus difficile techniquement de les recycler, leurs hautes valeurs leur confèrent des incitations très fortes à les recycler. Il convient de remarquer que les marchés des métaux précieux sont importants même si ils sont peu produits. La production primaire d'or génère ainsi un chiffre d'affaire équivalent à celui de l'aluminium. Ces métaux ne sont pas forcément faciles à cerner car ils engendrent aussi d'importants motifs de spéculation et agissent comme réserve de valeur pour beaucoup d'agents économiques. Les prix de ces métaux contrairement aux métaux de base suivent parfois des tendances contra cycliques à la croissance économique.

¹³ Ppm : partie par million soit 10⁻⁶. Un ppm représente 1g par tonne.

- **Les métaux mineurs ou petits métaux** rassemblent des métaux hétéroclites qui convergent vers un ensemble de facteurs communs. Leurs productions souvent faibles (inférieures à 200kt) restent la plupart du temps monopolisées par un petit nombre de pays, ce qui peut constituer un risque de rupture d’approvisionnement. Les productions des petits métaux sont aussi volatiles, du moins davantage que les autres métaux. Ceci s’explique en grande partie par leurs tailles de marché souvent très réduites (moins de 1G\$), renforçant la probabilité de création rapides de grands déséquilibres entre l’offre et la demande. La taille restreinte de ces marchés n’encourage pas non plus la création d’un marché organisé et l’établissement de marché à terme avec des cotations au *London Metal Exchange* (LME)¹⁴. Ces petits métaux sont peu recyclés en général car ils sont présents à l’état de trace ou de faible concentration dans les produits (alliage, usage dispersif...) rendant du même coût le recyclage onéreux sans qu’il soit rentabilisé pour autant. Ainsi, les batteries de lithium-ion jusqu’à aujourd’hui étaient recyclées uniquement pour leur contenu en cuivre, nickel et cobalt mais pas du tout pour le lithium. Ces marchés sont assez instables, c’est-à-dire que la demande qui est adressée à ces marchés peut connaître des variations supérieures à 20% par an. Ce qui signifie qu’ils peuvent croître et décroître rapidement. Difficile donc de dire si ces métaux sont en devenir ou non. Comme l’illustre la Figure 1-17, discriminer les petits métaux par leur valeur économique ou leur concentration n’est pas très pertinent vu que ce groupement abrite une masse non homogène de métaux du point de vue du prix ou de la rareté géologique. Plus globalement, on pourrait dire que les métaux rares peuvent avoir une valeur d’usage élevée dans certains secteurs high-tech notamment, mais qu’au niveau de l’économie en général leur valeur d’usage est moyenne. Cet usage encore focalisé à des secteurs bien précis explique pourquoi leurs valeurs d’échange sont encore limitées. Ainsi le tellure pourtant plus rare que l’or au niveau géologique ne bénéficie pas d’un prix aussi élevé (220\$/kg contre 50 000\$/kg).

L’un des principaux apports de cette nouvelle classification est d’éviter l’écueil classique d’une partition dichotomique entre des métaux qui possèdent certaines caractéristiques et d’autres métaux qui n’en bénéficient pas, écartant du même coup la création d’une classe « fourre tout » en parallèle d’une classe homogène. Notre typologie apporte donc un éclairage

¹⁴ Seuls le cobalt et le molybdène sont cotés au LME.

différent sur des métaux généralement délaissés. Notre approche a aussi l'avantage de classer les métaux sans *a priori* grâce à l'usage d'une classification non supervisée.

Un autre atout de notre nouvelle typologie consiste à clairement expliciter les critères discriminants sur laquelle elle est fondée. La prise en compte de nombreux facteurs économiques rend davantage compte d'une réalité certainement encore plus complexe.

Cette nouvelle typologie économique des métaux procure aussi une plus value en terme de quantification des critères discriminants, un élément la plupart du temps absent des autres taxinomies économiques des métaux.

Comme on peut le voir sur la Figure 1-19, une classification comme celle de l'UNEP qui mixe pourtant des approches différentes ne rend pas bien compte de la réalité empirique en sur-divisant des groupes de métaux aux caractéristiques pourtant communes et au contraire en sur-agglomérant des métaux très dissemblables.

Néanmoins, bien plus que les points de désaccord, il convient aussi d'observer les fortes ressemblances entre les groupes des deux classifications. Cette forte proximité du découpage des catégories de métaux tend à renforcer l'hypothèse d'une convergence des classifications théoriques vers une réalité empirique plutôt difficile à appréhender. Cette similitude sur les grandes lignes conforte aussi la pertinence de notre approche. Celle-ci tout en éclairant certains manquements reste malgré tout ancrée dans le cadre global construit par les typologies précédentes.

Enfin, le lecteur remarquera qu'à contrario des typologies non économiques, les typologies économiques ne sont pas assurées d'être pérennes car les conditions économiques changent. En d'autres termes, la place des individus dans les groupes mais aussi les frontières des groupes sont amenés à changer dans le futur car les valeurs des critères sur laquelle s'appuie la typologie économique évoluent constamment.

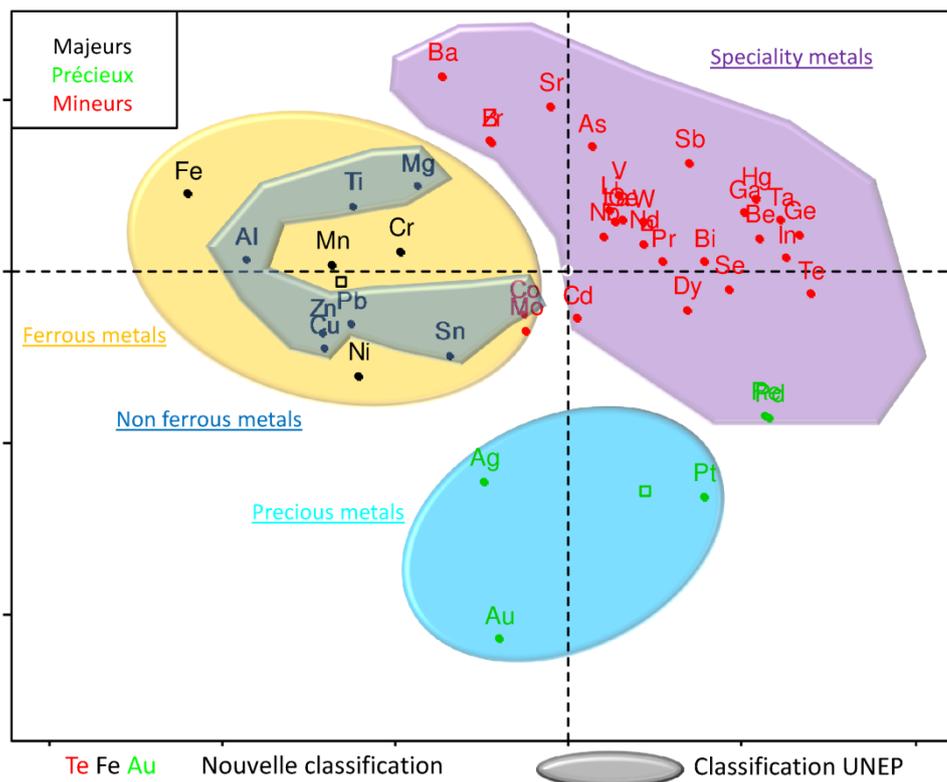


Figure 1-19 Comparaison entre la vision mixte de l'UNEP et la nouvelle classification économique des métaux.
Source : auteur

4.2 Perspectives de recherches

Plusieurs voies d'amélioration sont susceptibles de rendre cette nouvelle typologie économique des métaux plus performante et plus représentative de la réalité. Ces améliorations revêtent à la fois des aspects quantitatifs et qualitatifs.

Il apparaît tout d'abord clairement que l'intégration de nouveaux métaux ne pourra qu'améliorer le pouvoir représentatif de la typologie. Faute de statistiques exhaustives sur un bon nombre de métaux, nous n'avons pu étendre notre méthodologie qu'à un sous groupe de l'ensemble des métaux de notre économie (43 sur 60). L'ajout des autres métaux précieux et des terres rares restantes notamment ferait progresser considérablement notre vision des choses.

Parallèlement à l'ajout de nouveaux métaux, l'accroissement du nombre de variables pertinentes, comme déjà suggéré précédemment, capturerait des sous-jacents économiques jusqu'à là hors de portée.

Ensuite, comme la position des métaux dans cette classification ne demeure pas figée, une réévaluation régulière de leur positionnement dans le futur pourrait s'avérer pertinente, particulièrement avant la mise en place de certaines politiques stratégiques et industrielles.

Enfin, la hausse des performances des méthodes quantitatives de classification des métaux passera aussi par une meilleure compréhension des forces économiques guidant la production et la demande de métaux. C'est pourquoi la création et l'apport de la recherche théorique sur cette thématique demeure la principale source de bonification et de renforcement de cette nouvelle typologie économique des métaux.

5 Implication des métaux rares dans les nouvelles technologies de l'énergie

Les métaux rares occupent aujourd'hui une place de premier plan à la fois dans l'essor des nouvelles technologies de l'énergie mais aussi dans l'amélioration des technologies existantes. Les métaux rares renforcent l'efficacité des technologies de l'énergie tout au long de la chaîne de valeur, de la production énergétique à son usage final. L'usage à grande échelle des métaux rares et leur intégration grandissante dans nos économies est un phénomène relativement nouveau, peu développé encore au début des années 80. La palette des métaux du métallurgiste s'est en effet considérablement agrandie depuis, passant d'environ dix métaux à plus d'une soixantaine (Assemblée nationale, 2011). Nous n'aborderons pas les nombreux autres débouchés des métaux rares (nouvelles technologies de l'information et de la communication, électronique, télévision). Ces autres secteurs représentent aujourd'hui une part non marginale de la demande et bien souvent l'essentiel des débouchés des métaux rares. Toutefois, les besoins en métaux rares de ces secteurs tendent à s'amoinrir ou à s'accroître à une vitesse inférieure aux besoins des secteurs des nouvelles technologies de l'énergie.

Contrairement aux métaux de base ou aux métaux précieux, les métaux rares n'assurent que très rarement le rôle de support de l'activité ou des procédés. Ils viennent principalement améliorer les résistances techniques des premiers (résistances thermiques, mécaniques, corrosives...) et renforcer l'efficacité du second groupe pour en réduire la quantité nécessaire. Pour reprendre l'image de Christian Hocquart (2012), les métaux rares agissent dans nos économies d'une manière similaire aux vitamines pour l'organisme. Ils accélèrent et raffermissent l'efficacité des nos produits et services. Le but de cette section a pour objectif d'évaluer l'implication des métaux rares dans le secteur de l'énergie que ce soit en amont ou en aval de la production énergétique (Figure 1-20).

5.1 *Le rôle des métaux rares dans les technologies amont de l'énergie*

Actuellement, il existe peu de technologies de production énergétique qui n'ont pas recours aux métaux rares à un moment ou un autre de la chaîne. Cette description n'a pas pour objectif l'exhaustivité, et l'absence d'une technologie dans la panoplie détaillée ci-dessous ne signifie pas que celle-ci n'emploie pas de métaux mineurs. Le but est davantage de dresser un panorama des différents rôles des métaux mineurs dans les technologies de l'énergie. Cette inventaire fut réalisé sur la base de diverses sources ayant établies des monographies sur les métaux mineurs (JRC, 2005; ADEME, 2010; EDF, 2011; BRGM, 2010 ; 2011; JRC, 2011 ; Hagelüken et Meskers, 2010)

Soutien et réduction de l'empreinte environnementale des énergies carbonées

Pétrole : Le secteur pétrolier recourt aux métaux mineurs dès le processus de forage (profond et multidirectionnel) via des équipements en carbure de tungstène dont la dureté n'est surpassée que par le diamant. On trouve également du béryllium dans les bagues de frottement aux propriétés anti-gripantes des forages pétroliers. L'industrie pétrolière emploie ensuite différents métaux à des fins de catalyses (cobalt) dans le raffinage (germanium avec la zéolith synthétique et rhénium), la désulfuration du pétrole (molybdène, vanadium) mais également le craquage de pétrole lourd (lanthane, cérium, dysprosium, néodyme et molybdène). Les métaux mineurs intègrent également les éléments constituant la colonne de distillation grâce aux propriétés de résistances corrosives du tantale.

Centrales à gaz à cycles combinés et charbon supercritique : La volonté d'améliorer les rendements énergétique des centrales électriques à gaz et à charbon (30-35%) afin de réduire leur émission par MWh tout en accroissant l'efficacité économique passe par un changement de technologie vers des centrales à gaz à cycles combinés et des centrales à charbon dites « supercritiques » ou « ultra-critiques ». Ces technologies assurent des rendements énergétiques considérablement accrus (55 et 45% respectivement). Néanmoins la progression des rendements s'obtient ici grâce à l'élévation des températures de fonctionnement des centrales. Or, à de telles températures, les aciers ordinaires ou les alliages classiques à base de chrome et de nickel n'offrent plus des garanties suffisantes de résistance. C'est pourquoi l'usage de superalliages mélangeant plusieurs métaux mineurs dans des proportions variables (cobalt, molybdène, rhénium, tungstène, tantale, niobium, hafnium) est préféré car ces types d'alliage présentent des résistances thermiques et mécaniques tout à fait hors normes.

xTL : Les technologies permettant la conversion du charbon et du gaz en pétrole (CTL et GTL) confinent certains métaux rares (molybdène, cobalt, rhénium) au rôle de catalyseur dans les processus chimiques de transformation. Un rôle important et non substituable mais dont l'impact sur les métaux mineurs peut être relativisé car la transformation ne détruit pas le catalyseur ce qui rend possible son recyclage à l'issue d'un certain nombre de cycles.

Capture et séquestration du CO₂ : On connaît assez peu de choses sur les métaux employés par la technologie de capture et séquestration du carbone car celle-ci n'est encore qu'au stade de R&D voire au mieux d'installation pilote. On peut néanmoins estimer que ce secteur utilisera des quantités non négligeables de vanadium et niobium mais aussi du cobalt, du molybdène, du tantale, du rhénium et de l'yttrium pour assurer ses besoins en alliage de haute qualité pour l'infrastructure permettant d'acheminer le CO₂ vers le lieu de stockage final (JRC, 2011).

Développement d'énergies alternatives

Nucléaire de fission : Le nucléaire représente aussi un secteur important et diversifié d'application des métaux mineurs. De nombreux métaux mineurs sont intégrés dans le processus de contrôle de la réaction dans le cœur comme par exemple l'indium (barre de contrôle), l'antimoine (grappes sources secondaires), le gadolinium (poison neutronique), le cadmium (grappes de commande) ou le bore (acide borique dissous dans l'eau). D'autres métaux mineurs possèdent davantage des rôles de support comme le cobalt dans les superalliages, le lithium qui ajuste le PH de l'eau pour limiter l'effet corrosif de l'acide borique, le niobium et le zirconium constituant les gaines et les grilles des assemblages des crayons. L'efficacité de l'écran réflecteur de neutron autour du cœur dépend aussi totalement du béryllium. Enfin, on trouve du tungstène dans les conteneurs nucléaire anti-irradiation.

Nucléaire de fusion : Là encore, les éléments fournis ci-après sont sujets à caution car cette technologie n'a pas encore passé le stade de la R&D (à l'exception peut être des tokamaks). Le nucléaire de fusion (ITER) n'échappe pas à la règle en ce qui concerne la consommation de métaux mineurs. Il partage certains points communs avec les réacteurs à fission comme la constitution d'un écran réflecteur de neutron en béryllium mais réclame aussi du tungstène pour la construction du plancher de la chambre à plasma, et de niobium pour les bobines supraconductrices. Sans oublier l'élément principal, le combustible à base de tritium-deutérium dont le premier élément nécessite du lithium-6 présent dans le lithium naturel pour

sa fabrication. Les estimations actuelles consacrées à la consommation d'un réacteur à fusion de 1000MWe évaluent ce besoin dans une fourchette de 2 à 4 tonnes de lithium par an.

Centrale solaire thermodynamique : Les aciers des technologies solaires à concentration requiert une gamme de métaux limitant la corrosion et améliorant les résistances thermiques des aciers ordinaires. Par conséquent, on trouve du molybdène, du vanadium et du niobium à la fois dans les technologies à tour et les centrales à miroir cylindro-parabolique.

Photovoltaïque de seconde génération : les nouvelles générations de panneaux photovoltaïques à couches minces qui gagnent actuellement des parts de marché sur les panneaux classiques de silicium monocristallins et polycristallins reposent sur l'usage d'une multiplicité de métaux mineurs. Deux technologies se partagent ce marché encore mineur, les technologies Cad-Te et CIGS (Copper Indium Gallium Selenium). Ces panneaux de seconde génération offrent des rendements inférieurs mais des coûts économiques et environnementaux plus faibles que les panneaux traditionnels. Reste à déterminer si les nouvelles technologies à base de silicium amorphe surpasseront ces technologies fondées sur la disponibilité des métaux mineurs.

Eolien : si l'éolien on-shore a pu se passer jusqu'à là de métaux mineurs, l'éolien off-shore ne permettant pas une maintenance facile et accessible en mer a développé une consommation accrue pour les aimants permanents à base de néodyme parfois dopé au dysprosium. Les technologies concurrentes à base de fer n'obtiennent ni la même puissance ni la légèreté des aimants à base de néodyme.

Biocarburants de 2^{ième} génération : d'une façon similaire à l'industrie pétrolière, la fabrication de biocarburants de 2^{ième} génération requiert des catalyseurs pour la synthèse de ces derniers. Le cobalt est généralement très souvent sollicité pour remplir cette fonction.

5.2 *L'intégration des métaux rares dans les technologies aval de l'énergie*

Les métaux rares sont déployés également dans une multiplicité de technologies liées à l'usage finale de l'énergie.

Stockage et distribution de l'énergie

Oléoduc et gazoduc : Le transport du gaz et du pétrole nécessite des alliages de haute performance employant souvent le molybdène, le niobium et le vanadium.

Réseaux intelligents : Peu d'études ont été dédiées à la consommation de matières premières sous-jacente au développement des *smart grids* mais il apparaît fort probable que celui-ci passera par une consommation supplémentaire de métaux mineurs. Les réseaux intelligents visent à optimiser la gestion de l'énergie grâce à une connaissance amplifiée et élargie de l'information disponible sur l'offre et la demande mais aussi sur les moyens de stockage. Ces *smart grids* impliquent donc davantage d'informatique et de moyens de communication améliorés (télécommunication par micro-onde¹⁵, fibre optique¹⁶...), deux secteurs piliers de la consommation actuelle de métaux mineurs.

Stockage de l'électricité : il existe de nombreux moyens de stockage de l'énergie dont un certain nombre de solutions n'entretenant pas de lien avec les métaux mineurs (station de pompage, stockage par air comprimé ou par volant d'inertie). Au contraire, les caractéristiques d'autres procédés sont basées sur les propriétés des métaux mineurs (stockage magnétique par supraconduction et stockage électrochimique).

Diminution de l'impact environnemental du secteur transport

Moteur et batterie de véhicule électrique et hybride : les différentes batteries électriques pour applications mobiles consomment toutes sans exception des métaux rares. Les batteries au lithium-ion incorporent du cobalt et du lithium, avec une consommation pouvant aller de 4 à 12 kilos de lithium par véhicule électrique. Les batteries au NiMH (*nickel Metal Hybrid*), autre option possible, comprennent dans leurs anodes un mélange de terres rares : le mishmétal (cérium, lanthane, néodyme, praséodyme).

Véhicule hydrogène (Pile à combustible) : le véhicule à hydrogène souvent présenté comme le véhicule de demain est composé d'une pile à combustible, renfermant du platine (un métal précieux). Seulement, les voies de progrès envisagées pour les deux principales technologies (PEMFC et SOFC) semblent recourir aux métaux mineurs. Les applications stationnaires des piles à combustibles de type SOFC fonctionnent à haute température donc nécessitent des céramiques et des aciers spéciaux onéreux intégrant des métaux mineurs. Une solution consisterait à doper la pile à combustible grâce à l'usage d'Yttrium et de Scandium (deux terres rares) pour abaisser la température optimale de fonctionnement et se passer d'alliages spéciaux. D'une façon similaire, les piles PEMFC demandent d'ore et déjà du tungstène et des recherches sont en cours pour les améliorer avec du lanthane.

¹⁵ La plupart des technologies d'émission d'onde micro-onde contiennent du béryllium.

¹⁶ Les fibres optiques sont dopées au germanium.

Pots catalytiques : A l'instar des piles à combustible, les propriétés dépolluantes et de filtration des pots catalytiques des véhicules sont principalement assurées par les métaux précieux du groupe des platinoïdes (platine, palladium, rhodium...). Ces métaux sont chers et les recherches sont concentrées sur les options permettant de réduire l'usage de ces derniers tout en gardant les mêmes propriétés. Une des solutions proposée consiste à utiliser de l'oxyde de cérium (une terre rare) pour diminuer la quantité de matériaux précieux nécessaire.

Aéronautique : Le secteur de l'aéronautique à la pointe de la technologie reste un gros consommateur de métaux mineurs. Les métaux mineurs permettent de parvenir à deux résultats principaux : (1) un abaissement de la quantité de carburant consommée grâce à l'allègement du poids de l'appareil. Les solutions techniques retenues recourent à des alliages de type aluminium-lithium ou des superalliages (composition donnée auparavant). (2) Un renforcement des résistances mécaniques et thermiques de la structure de l'avion et de ses turbines.

Efficacité de l'éclairage

Le remplacement des lampes à incandescence (tungstène) par les lampes fluo-compactes ou LED garantissant un meilleur rendement lumineux ne permet pas d'échapper à la consommation de davantage de métaux mineurs.

Lampes fluo-compactes : Les lampes fluo-compactes actuelles renferment de grandes quantités de poudre de terres rares (europium, cérium, yttrium, terbium) pour améliorer les propriétés optiques de la lumière. Les quantités de terres rares dans ces lampes ne sont pas négligeables, ce qui a récemment poussé Solvay-Rhodia à développer une usine prototype de recyclage de ces poudres de terres rares.

Diodes électroluminescentes (LED) : les LED sont pressenties comme la future génération d'éclairage. Elles offrent un rendement lumineux supérieur aux lampes fluo-compact mais souffrent de prix encore un peu élevés ce qui limite leur pénétration du marché. Les propriétés lumineuses de ces lampes s'appuient sur l'usage de gallium et d'arsenic avec des possibilités de substitution quasi inexistante.

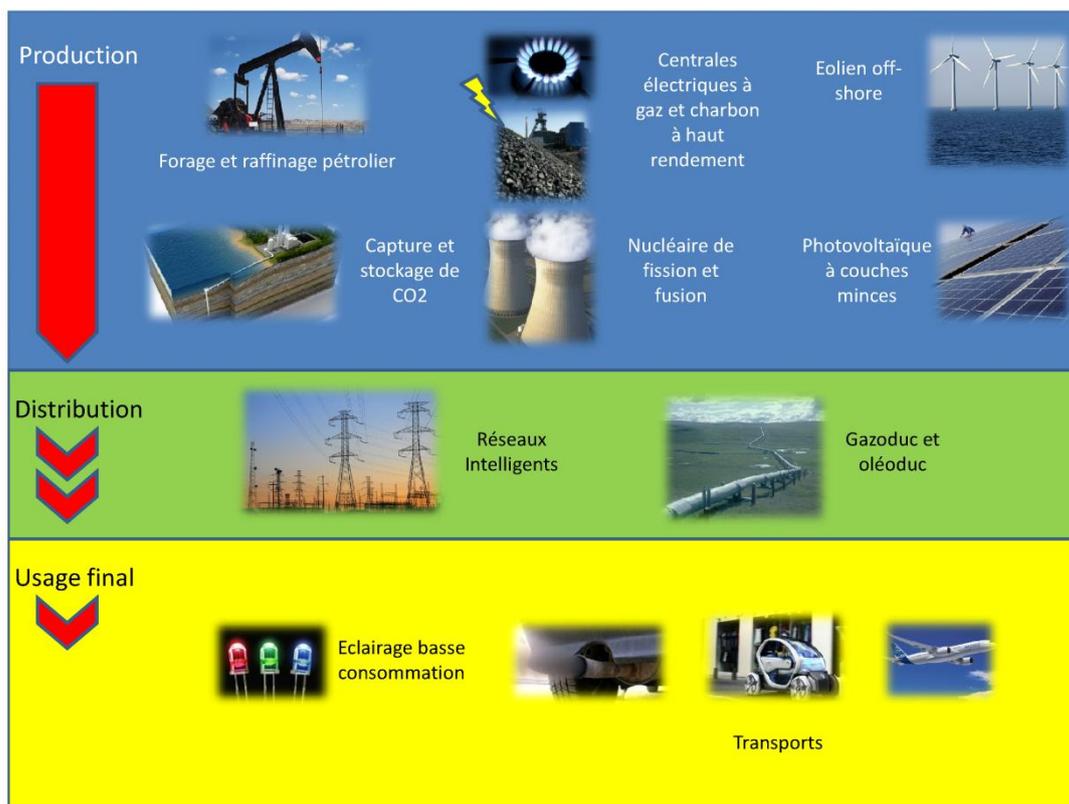


Figure 1-20 Secteurs de l'énergie concernés par l'usage de métaux mineurs. Source : auteur

6 Conclusion

L'issue de ce chapitre nous permet de dresser trois constats majeurs.

Le premier constat revient à valider la formation d'un groupe de métaux mineurs aux caractéristiques économiques propres et distinctes des autres groupes de métaux précieux et majeurs. Longtemps identifiés par opposition aux propriétés des métaux précieux voire ignorés totalement, les rôles occupés par les métaux mineurs tendent à se renforcer historiquement pour se rapprocher petit à petit du devant de la scène, monopolisé jusqu'ici par les métaux majeurs ou précieux.

Le second constat nécessite de reconnaître la place majeure dédiée aux métaux mineurs dans le cœur de la nouvelle révolution énergétique en cours. Ainsi, les métaux rares interviennent tout au long de la chaîne énergétique actuelle (Figure 1-20), mais surtout s'accaparent le rôle de catalyseur au sens large, aussi bien dans la lutte contre le réchauffement climatique et la décarbonisation de l'économie que dans le prolongement de l'usage des énergies carbonées. Le rôle de catalyseur résume ici assez bien la situation, il n'assure pas les supports principaux de la réaction mais se révèle indispensable pour la provoquer.

Enfin, le troisième constat soulève plutôt un questionnement multiple. Les micro-marchés des métaux mineurs suscitent peu d'analyses approfondies car leur émergence est relativement récente. De plus, les données économiques générales sur ces marchés (offre, demande, prix, jeu d'acteur...) s'avèrent la plupart du temps lacunaires voire totalement indisponibles, ce qui ne facilite pas la construction d'études quantitatives. En plus de ces obstacles à lever, la pleine compréhension des conséquences attachées à une consommation accrue de ces métaux passera probablement par l'étude indépendante de toutes leurs problématiques spécifiques. A savoir, la présence d'une production en tant que sous-produit majoritaire. Une forte concentration géographique de la production souvent doublée d'un risque géopolitique, un très faible recyclage généré par une absence d'incitations économiques et réglementaires, des micromarchés associés à une forte volatilité de la production et de la demande, une incertitude prégnante causée par une absence quasi-systématique de marchés à terme, et un manque frappant d'indicateurs sur l'épuisement de ces métaux (réserves, évolution des prix, des coûts...).

L'inquiétude portée à la disponibilité économique des métaux rares via les divers rapports évoqués dans ce chapitre souligne l'intérêt d'introduire les théories ayant façonnées notre compréhension de ce phénomène. Compte tenu de l'horizon de la transition énergétique (plusieurs dizaines d'années), il est apparu plus pertinent de se tourner vers les facteurs délimitant cette disponibilité économique à long terme. Parmi les principaux déterminants, le rôle de l'épuisement des ressources minérales ressort clairement comme l'une des contraintes décisives. C'est pourquoi, le chapitre suivant s'attachera à explorer les apports des différentes théories liées à l'épuisement des ressources minérales.

CHAPITRE 2 : LA THEORIE DE L'EPUISEMENT DES RESSOURCES NATURELLES : UNE PERSPECTIVE INTERDISCIPLINAIRE

« Les richesses naturelles sont inépuisables, car, sans cela, nous ne les obtiendrions pas gratuitement. Ne pouvant être multipliées ni épuisées, elles ne sont pas l'objet des sciences économiques. »

Jean Baptiste Say, *Traité d'économie politique*, 1803.

« Ce que nous appelons « création de richesses » n'est en fait qu'une transformation de ressources naturelles, et tout notre système économique ne consiste qu'à utiliser ces ressources pour en faire autre chose. »

Jean-Marc Jancovici, *Changer le monde. Tout un programme*, p.37, 2011.

« Edgar Morin aura montré le rapport de dépendance entre la dimension systémique de la réalité et sa complexité : plus un système est complexe, plus notre démarche devrait mobiliser des savoirs différents. La systémique est foncièrement un regard interdisciplinaire posé sur le monde. »

Frédéric Lenoir, *La guérison du monde*, 2012.

1 Introduction

1.1 L'importance des ressources naturelles

Les ressources naturelles sont depuis longtemps au cœur du processus économique. Ne parle-t-on pas d'ailleurs de l'économie comme la science destinée à étudier l'allocation des ressources rares ? Or, bien avant l'introduction du capital, les deux seules ressources rares furent les ressources naturelles et le facteur travail que l'homme combinait pour survivre. Plus tard au contraire, le travail et le capital furent consacrés à la production de biens et services à partir des ressources naturelles. Pendant longtemps - et à l'exception du facteur terre qui reste largement spécifique – le rôle des ressources naturelles a été largement ignoré par le courant dominant économique. Ces dernières sont pourtant bien à l'origine et à l'issue du processus économique. Les ignorer c'est manquer une grande partie du processus de création de valeur. La vision classique du système économique comme un cercle fermé apparaît à ce titre comme particulièrement trompeuse car elle sous-tend l'hypothèse que ces flux principalement

constitués de biens et services et de monnaie peuvent se perpétuer indéfiniment selon la seule volonté de l'homme (Cleveland et al., 1984 ; Daly, 1985). En réalité l'environnement via les ressources naturelles et leurs aménités sont d'un bout à l'autre de la chaîne. Leurs dégradations ou leurs destructions pourraient ainsi avoir des conséquences très fâcheuses sur la pérennité du « circuit économique ». Si les premières recherches se préoccupèrent de définir la rareté des ressources naturelles (le côté amont), l'effort depuis le tournant des années 90 (Tilton, 1996) se concentre principalement sur la détermination des capacités de l'environnement à absorber nos déchets (coté aval), conduisant Simpson et al (2005) à qualifier cette contrainte émergente de « rareté nouvelle » (voir aussi Fisher et Ward, 2000). D'une autre façon mais avec le même objectif, Diamond (2006) a mis en avant la mauvaise gestion des ressources naturelles et de l'environnement comme l'un des cinq facteurs clés concourant à l'effondrement et la disparition d'une civilisation. Compte tenu du degré d'avancement de la mondialisation (économique et culturelle), le prochain chapitre concernera probablement la civilisation planétaire.

Progressivement, l'intérêt pour les ressources naturelles a crû, non d'une façon progressive bien sûr, mais par à coup. Sans surprise, c'est bien en période de rareté relative de celles-ci que l'engouement pour mieux les comprendre s'est montré le plus fort. Le prix servant souvent de révélateur conformément à la théorie économique qui y voit le signal de la rareté par excellence. Mais le subit intérêt aussi fort que pressant de la recherche et du monde scientifique sur cette question à aussi un revers de médaille, c'est une part délibérément trop grande accordée au court terme et au contexte environnant la rédaction de ces théories (Robinson, 1989). Les théoriciens et praticiens ont ainsi souvent l'impression que ce que le monde vit est représentatif de la course qui se joue à long terme. La tentation est alors grande d'extrapoler à partir de cette croyance des conclusions erronées sur le futur. Mais c'est surtout au travers de la soutenabilité de la croissance que le rôle des ressources naturelles a connu la plus grande audience. Aujourd'hui encore, les discours sont nombreux et l'omniprésence du développement durable dans toutes les bouches ne doit pas cacher que cet unique mot désigne de nombreuses positions, sans oublier qu'il existe toujours des courants favorables à l'état stationnaire, ou à la décroissance. Néanmoins, la croissance du développement durable et la prise en compte de l'environnement dans les problématiques économiques depuis le début des années 70 reflètent l'émergence ou du moins le rejaillissement¹⁷ d'une conscience des limites inhérentes au monde. Comme l'affirmait Boulding (1966), la société humaine doit concevoir

¹⁷ Si on considère que d'autres courants économiques plus anciens avaient déjà considéré ces questions.

qu'elle relève davantage de « l'économie d'un vaisseau spatial » que d'une « économie de cow-boy ». La croissance de la consommation et de la production étant à proscrire dans la première configuration alors qu'elle peut être encouragée dans la seconde. Bien que certains économistes (voir Nordhaus, 1974), aient soulevé cette question des limites à la croissance dans un monde fini, la plupart d'entre eux ont rapidement évacué cette inquiétude en invoquant les remèdes salvateurs du progrès technique et de la substitution. Ce renversement leur a permis de transformer la problématique des limites à la croissance en une question reposant sur la croissance des limites. Toutefois, bien que le « *mainstream* » économique continue à adopter la même posture vis-à-vis des ressources naturelles nous verrons que d'autres courants économiques et non économiques ont fait le choix de remettre en cause cette vision et d'en tirer des conclusions sur les conditions de la pérennité de l'activité humaine.

1.2 *L'angle d'approche de la disponibilité économique de long terme*

La thèse de la rareté de long terme des ressources naturelles sera envisagée comme une ambivalence, c'est à dire dans un sens étroit (en nous limitant aux facteurs de long terme et aux ressources épuisables) et large à la fois (car nous envisagerons les théories économiques et non économiques).

Etroit en premier lieu, car nous ne développeront pas des facteurs de court terme qui bien qu'ils puissent influencer la rareté d'une ressource à court terme n'ont pas d'impact majeurs sur la disponibilité économique de long terme. A titre d'exemple, la crise pétrolière de 1973 qui a pu être interprétée comme un relèvement de la rente de rareté, tient davantage d'une manifestation temporaire d'un pouvoir de marché ; tout exercice de pouvoir de marché réussi créant lui-même les facteurs de sa disparition (Gaudet, 2007). Autre lieu, autre époque, la crise des terres rares que nous traversons aujourd'hui et qui semble marquer les esprits devrait normalement se résorber d'ici la fin de la décennie, le temps que des pays externes à la Chine détenant les deux tiers des réserves ouvrent de nouvelles mines. Etroit aussi, puisque nous nous limiterons principalement à l'étude du facteur de l'épuisement pour appréhender la disponibilité économique de long terme. Ce choix s'enracine dans une perception du rôle central de l'épuisement dans la détermination de la disponibilité économique de long terme d'une ressource minérale. Etroit enfin, car nous n'interviendrons pas sur l'épuisement des ressources naturelles renouvelables. On n'entend par renouvelable, une ressource dont la faculté de reproduction est positive à travers le temps humain. L'échelle temporelle est importante car des ressources énergétiques carbonées et des minerais se forment au quotidien sous nos pieds. En revanche, les quantités qui se forment en ce moment même sont minimes

au vue de leur proportion par rapport aux quantités globales en place. Ces ressources renouvelables restent malgré tout importantes car elles constituent la plupart de notre passé¹⁸ et c'est sur elles que reposent probablement notre transition viable vers le futur.

Large en second lieu, car nous ne limiterons pas l'analyse de l'épuisement à la sphère économique. L'épuisement est un phénomène faisant intervenir de multiples facteurs non économiques. Il n'est donc pas surprenant que le champ de l'épuisement fut investi également par des recherches non économiques (géologiques, biologiques, physiques, sociologiques...). Percevoir l'épuisement comme un phénomène uniquement économique revient à vouloir comprendre la trajectoire d'un avion de papier lancé d'une falaise tout en ignorant la force du vent et sa direction, la matière le constituant, son aérodynamisme, son poids et en se fiant uniquement à la force du lanceur.

L'objectif de cette section est aussi multiple : relater la progression de la connaissance sur le phénomène d'épuisement des ressources dans une perspective interdisciplinaire puis tenter une difficile mais nécessaire synthèse des facteurs liés à cette problématique. Cette progression sera exposée dans un déroulement chronologique. Des auteurs ont déjà regroupé les courants faisant le lien entre croissance et environnement (Turner, 1991) en grands thématiques¹⁹. Néanmoins, si cette construction peut parfois apparaître comme plus claire, elle ne se justifie pas au regard de plusieurs éclairages nécessaires à apporter. Un développement chronologique souligne les contextes environnant la construction des thèses des auteurs et nous verrons que ce contexte est quasi-déterministe dans la création de recherches sur l'épuisement. En outre, l'approche chronologique permet aussi de mettre en lumière les influences et les héritages de chacun des courants. Loin de s'être construit indépendamment, la plupart des théories héritent en partie d'idées antérieures ou au contraire naissent en réaction à un autre courant.

1.3 La révolution industrielle comme point de départ

L'histoire de l'épuisement des ressources naturelles par l'homme commencent certainement dès son apparition. Toutefois, nous ne commenceront véritablement notre histoire qu'au milieu du XVIIIème siècle. Pourquoi la problématique des ressources naturelles et leurs épuisements émergent seulement à l'aube du XVIIIème siècle ? La vie humaine a longtemps

¹⁸ On parle ici du passé humain antérieur à la révolution industrielle. D'après Neumayer (2000), l'économie allemande en 1996 consommait en termes de poids 50 fois plus de ressources non renouvelables que de ressources renouvelables.

¹⁹ Voir en particulier Faucheux et Noël (1995), *Economie des ressources naturelles et de l'environnement*.

basée sa subsistance sur les ressources naturelles renouvelables. L'énergie utilisée par l'homme jusqu'au début du XIX^{ème} siècle comporte principalement des énergies renouvelables comme la biomasse, le vent et l'énergie animale voire l'énergie humaine dans certaines configurations. Il a fallu attendre la fin du XVIII^{ème} siècle pour voir se répandre les premiers usages des ressources énergétiques épuisables comme le charbon en Angleterre. Du côté des métaux, les premières usages datés remontent à 15 000 avant J.C. et sont attribuées à l'or et au cuivre (Craig et al., 2001). Ces exploitations particulièrement précoces de métaux ne sont pas dues au hasard mais à la nature géochimique des gisements. En effet, le cuivre et l'or ainsi que le fer ont la particularité d'être présents à l'état natif dans la nature, c'est-à-dire non liés chimiquement (Bihouix et De Guillebon, 2010). Les hommes n'avaient alors qu'à se « baisser » pour extraire les métaux. D'autres métaux nécessitant une extraction par fusion primitive sont également produits depuis l'antiquité, on compte en plus à ce titre l'argent, le plomb et l'étain (Laznicka, 2010). Les autres types de gisements de métaux sont associés chimiquement soit à l'oxygène, on parle alors d'oxyde, soit au soufre, on parle alors de sulfure. Il faut des techniques un peu plus perfectionnées pour séparer des minerais les métaux liés chimiquement et il est surtout nécessaire d'obtenir les connaissances de la chimie moderne aux alentours de 1750 pour commencer à isoler les autres métaux, inconnus jusqu'alors. Les métaux sont donc parmi nous depuis l'antiquité puisque leur importance marquèrent même les âges (âge du cuivre, âge du fer...). Néanmoins leurs productions restent largement anecdotiques en proportion des quantités produites aujourd'hui, confinant dès lors la question de l'épuisement à des périodes précises, temporaires et locales. Il faut véritablement attendre le siècle des lumières pour voir s'effectuer un basculement intellectuel. La nature est alors vue comme un nouveau lieu à conquérir via les sciences et la technique. Plus tard viendra l'idée que la technique s'oppose à la nature en la soumettant à l'homme. Le basculement intellectuel est bientôt suivi d'un basculement dans l'action : la révolution industrielle. Il existe diverses positions pour dater le début de la révolution industrielle, mais nous reprendrons l'argumentaire de Bairoch (1997, p. 113) qui fait débiter cette importante période aux environs de 1730 en Angleterre. Sans analyser profondément les causes de cette rupture progressive, c'est principalement la révolution agricole et les innovations techniques importantes alimentant le secteur industriel qui permettent de poser ce premier jalon.

La révolution industrielle marque donc une rupture très importante dans la thématique de l'épuisement des ressources naturelles car elle décuple la pression de l'homme sur la nature. Cette augmentation brutale de la pression exercée sur la nature s'explique par l'explosion de

deux variables clés liées à l'épuisement : la population et le PIB par tête. Suite à la révolution agricole et à l'augmentation grandissante des surplus agricoles mais aussi grâce au progrès de la médecine au cours des siècles qui suivront, la population va augmenter de façon vertigineuse. Entre la révolution néolithique et la révolution industrielle, la population mondiale double à peu près tous les 1300 ans (Bairoch, 2010). Entre 1760 et 1960 la population mondiale quintuple et elle doublera encore entre 1960 et 2000 (Figure 2-1). Au 31 octobre 2011, nous étions 7 milliards sur terre, et l'ONU estime dans sa projection centrale que l'humanité comptera environ 10,9 milliard d'homme en 2100 à cause d'un ralentissement de la croissance démographique (United Nations, 2013). Cette croissance tendancielle explique pourquoi depuis l'origine un homme sur deux est né durant les deux derniers millénaires et un homme sur cinq durant les deux derniers siècles (Ined). Lorsque nous serons 10,9 milliards en 2100, les hommes vivants sur terre représenteront 10% de la totalité des hommes s'étant succédés depuis leurs origines (plusieurs centaines de milliers d'années) alors qu'ils n'occupent qu'une période ridiculement faible (moins de 0,1% du temps de l'humanité). Nous verrons que ce facteur a cristallisé très logiquement nombre de craintes en lien avec l'épuisement des ressources naturelles.

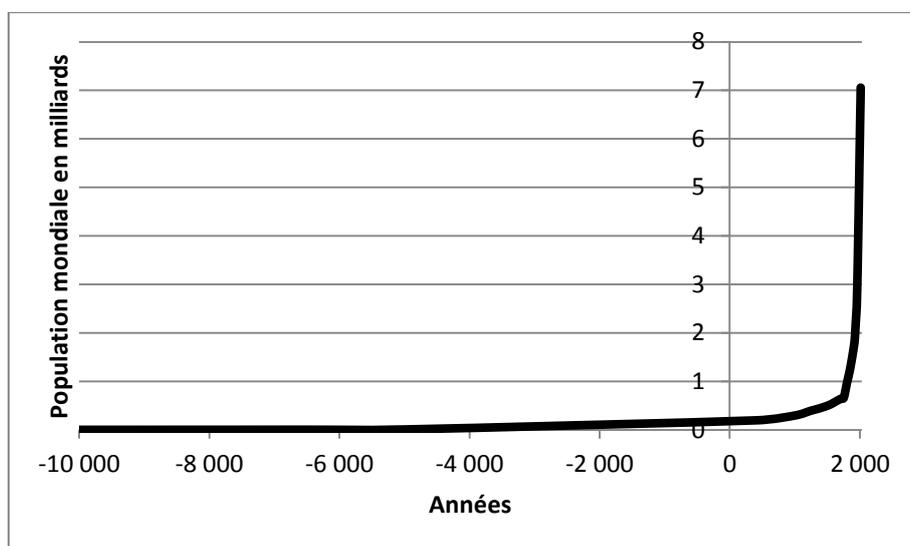


Figure 2-1 Evolution de la population mondiale entre 10 000 Av. J.C. et nos jours, Source : Données United State Census Bureau et adaptation de l'auteur

La révolution industrielle signifie aussi l'extension gigantesque de la production humaine toutes choses égales par ailleurs. Le développement à grande échelle de l'énergie fossile, le charbon d'abord puis le pétrole et le gaz, associé à la technologie permet à l'homme de décupler sa force pour extraire et convertir les ressources naturelles en biens et services. En effet, l'usage de ces nouvelles énergies assure un surplus énergétique colossal et garanti au

capital et au travail une productivité croissante fondée sur une progression de la puissance énergétique mise à disposition (Cleveland, 1991a ; 1993). Pour la première fois durant son histoire, l'homme ne vit plus au rythme du temps imposé par la nature (rythme des saisons et régénération des ressources renouvelables) mais dicte lui-même la vitesse de production. Celle-ci n'aura de cesse d'augmenter jusqu'à nos jours. Barbier (2011, p.677) évoque cette mutation de nos économies, consistant à passer d'un stade d'économie organique avancé vers un stade d'économie énergétique basé sur les ressources minérales. Le second stade permettant de s'affranchir des contraintes malthusiennes caractérisant le premier stade.

Pour la première fois, la production par tête augmente, de façon durable. Bairoch (1997, p.113) note ainsi que le rythme de la croissance économique des pays effectuant leur premier siècle de révolution industrielle devait se situer autour des 1% par an. Rappelons que la croissance économique même faible au vue de nos standards actuels restait un phénomène totalement inédit, les sociétés agraires antérieures à cette époque se caractérisaient ainsi par une stagnation économique ou au mieux une croissance économique si faible qu'elle en demeurait presque imperceptible statistiquement, c'est-à-dire entre 0,1% et 0,3% par an (Seurot, 2006 ; Dasgupta, 2005)²⁰. La croissance économique fait passer le PNB par habitant des pays développés de 182 à 3320 dollars constants de 1960 entre 1750 et 1995 soit une multiplication par presque 20 en deux siècles et demie (Bairoch, p.111). Cette augmentation de la production en parallèle à la population est-elle à ce point exceptionnelle pour que les prélèvements sur la nature soient radicalement différents de ce qui avait lieu jusqu'alors ? Indubitablement, la production d'aujourd'hui n'a absolument rien avoir quantitativement avec celle qui a pu avoir lieu à l'antiquité, durant l'empire romain ou le moyen âge. Il était très difficile jusqu'à récemment d'affirmer avec certitude cette dernière hypothèse car les historiens ne possédaient que de rares écrits pour les périodes anciennes et dans la plupart du temps plutôt imprécis. Difficile d'estimer avec précision par conséquent la production de ressources à ces époques. La science au travers d'une équipe de scientifiques (Hong et al, 1996) a fait progresser cette connaissance en se basant sur la reconstruction des émissions de polluants supérieures au niveau naturel (donc d'origine anthropogène) à différentes époques. Les carottes glacières ont en effet la particulière singularité de pouvoir nous faire remonter le temps car elle emprisonne des bulles d'air de l'époque de façon totalement hermétique. Nous pouvons donc obtenir la composition de l'atmosphère à différentes époques et déceler des

²⁰ Dasgupta (2005) fondé sur les données de Madison (2001) et de la banque mondiale suppose un taux de croissance annuel moyen de 0,14% entre -5000 Av. JC. et 1800 Ap. JC.

polluants émis par la production de métaux dans des quantités significativement différentes des niveaux naturelles. Les techniques de production n'étant pas les mêmes à ces différentes périodes, un coefficient correcteur suffit à obtenir grâce à la quantité de polluant, la production de métal qui en est à l'origine. Au travers de deux articles (Hong et al., 1994 ; 1996), cette équipe du CNRS a donc reconstitué la production de plomb et de cuivre et leurs résultats étayant l'idée que nos productions actuelles atteignent des grandeurs jusqu'à là inégalées (Figure 2-2). Par le passé, seule la période romaine a vu des productions quasi aussi importantes que le tout début de la révolution industrielle. La production de plomb a atteint graduellement au cœur de l'empire romain un niveau avoisinant 80 kt par an puis chuta à moins de 10 kt suite à l'épuisement des mines romaines. Ce niveau ne sera dépassé qu'en 1750. Aujourd'hui, l'homme extrait à travers le monde plus de 4 millions de tonnes de plomb par an. La production du cuivre de son côté a pu être reconstruite depuis 4000 Av J.C. jusqu'à nos jours et montre deux pics significatifs antérieurs à la période de la révolution industrielle : un durant l'empire romain (entre 200 Av. JC à 400 Ap. JC) à environ 15 kt par an, et un autre à l'époque de la dynastie Song en Chine (au XIIIème siècle) au même niveau. Rappelons que durant l'année 2010, en pleine crise, plus de 16 millions de tonnes de cuivre furent tirées de la croûte terrestre soit environ mille fois plus qu'à ces périodes historiques fastes.

Enfin dernière illustration du découplage extraordinaire de la puissance de l'homme par la technique et l'énergie bon marché abondante, les volumes de roches et de sols déplacés par l'homme (40 à 42 Gt) au niveau mondial atteignent aujourd'hui celles de l'érosion naturelle (53 Gt)²¹ ! La faculté de l'homme à modifier le paysage terrestre fait désormais armes égales avec celle de la nature. La communauté scientifique internationale discute d'ailleurs en 2012 l'existence de l'Anthropocène, une nouvelle période géologique succédant à l'Holocène. Cet Anthropocène souligne les activités anthropiques comme la nouvelle contrainte dominante surpassant les autres forces géophysiques. Toutes ces manifestations du pouvoir de l'homme sur la nature ont débuté lors de la révolution industrielle c'est donc en toute logique que nous commencerons notre inventaire des théories de l'épuisement à partir de ce point dans l'histoire.

²¹ Chiffres tirés du BRGM.

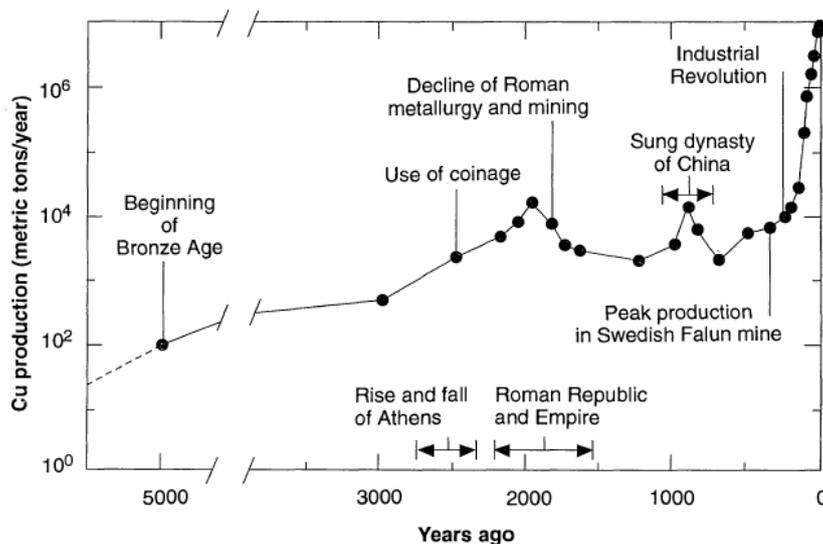


Figure 2-2 Evolution de la production de cuivre depuis 3000 Av JC, Source : Hong et al. (1996, p.247)

2 De la nature comme source de l'économie à la nature comme contrainte

2.1 Les physiocrates : l'économie et la reconnaissance du rôle la nature

Les physiocrates sont souvent reconnus comme les premiers économistes de notre histoire. Ils s'appelaient d'ailleurs entre eux « les économistes ». Ce sont les premiers à s'être véritablement interrogés sur les origines de la valeur créée par l'économie et sa circulation. Le nom de ce mouvement met dès lors la puce à l'oreille car physiocrates provient de l'association de deux mots grecs : phusis (la nature) et kratein (gouverner). L'économie consiste pour eux à « gouverner » la nature. Leur leader fut probablement François Quesnay qui fut à l'origine du *Tableau économique* en 1758. Ce tableau résume l'essentiel des circulations de richesses dans l'économie. Ces travaux ont d'ailleurs en partie influencés la vision économique moderne du circuit économique telle qu'elle est envisagée en comptabilité nationale. L'objectif des physiocrates ne différait pas radicalement de celle de la comptabilité moderne car il visait à aider le monarque à optimiser la création de richesses et leur allocation.

Là, où les physiocrates rompent totalement avec la vision moderne, c'est qu'ils voient au travers des facultés « miraculeuses » de la terre à produire de la nourriture et des matières premières, la seule et unique source de création de richesses de l'économie. Au contraire, le commerce et l'industrie sont considérés comme des activités stériles ne transformant que le produit de la terre et de la nature. Cette position sera vivement contestée par les courants classiques et marginalistes qui voient plutôt dans le travail et le capital la création de valeur d'une économie. Cette ignorance du rôle de la nature sera renforcée par l'absence flagrante des ressources naturelles dans les modèles de croissance économiques des années 50. De

façon subsidiaire et marginale, la nature pouvait toutefois apparaître au travers de la question du facteur terre mais dans une vision étroite et réductrice.

Il y a donc cette idée centrale chez les physiocrates que l'homme dépend de la nature pour assurer sa subsistance et son activité. Une thèse qui tombera peu à peu dans l'oubli jusqu'au début des années 70 où suite à l'émergence de l'économie de l'environnement, on attribuera une place à nouveau à la nature via le capital naturel (Schumacher, 1973 ; El Serafy, 1991 ; Costanza et Daly, 1992). Ces travaux sont donc précurseurs à l'économie écologique (Cleveland, 1987) mais également au rapport Meadows (1972) qui voit la croissance économique comme un phénomène fondé sur les ressources naturelles et l'environnement et impose donc par cette même voie des limites. Même s'ils n'évoquent en aucun cas l'épuisement des ressources naturelles, l'apport des physiocrates est essentiel dans la mesure où ils lient dès la naissance de la science économique, l'activité économique et la nature. Sans nature pas d'activité économique. Il y a l'idée sous jacente qu'une dégradation ou un épuisement de la nature conduirait à la perte de l'économie. Un thème qui générera des inquiétudes et des thèses importantes chez leurs successeurs - lors du courant classique - auquel on a souvent prêté le nom de *dismal science* ou science lugubre.

2.2 La période classique et marginaliste : les ressources naturelles comme un corridor vers l'état stationnaire

Il existe un paradoxe dans l'économie classique qui bien qu'elle ne perçoit plus la nature comme la source de la création de la valeur (désormais attribué au travail et au capital) ressasse la sempiternelle menace de l'état stationnaire au travers des rendements décroissants affectant la production des ressources naturelles. Ces limites sont décrites de différentes manières mais les contraintes de la nature conduiront tôt ou tard l'économie vers un état stationnaire. Les économistes classiques parallèlement aux physiocrates restent au départ focalisés sur le versant agriculture des ressources naturelles. C'est bien la ressource agricole qui assure les fondations de l'économie car elle assure la reproduction de la force de travail (Marx), la croissance de la population (Malthus) et l'extension des forces de la nation (Ricardo et Smith). C'est donc par elle que de nombreux économistes classiques vont appréhender une fin potentielle à l'enrichissement de la nation. La reconnaissance des économistes contemporains à ce courant en ce qui concerne l'épuisement des ressources naturelles est évoquée à plusieurs reprises (Tilton, 2003 ; Robinson, 1989 ; Hall et Hall, 1984 ; Erhlich et Erhlich, 2009).

Globalement, ce sont les questions des rendements des terres en ressources naturelles qui vont le plus accaparer l'attention de ce courant. Une population et une croissance économique en hausse tendent vers l'utilisation de davantage de ressources naturelles. Que se passe-t-il alors ? Observe-t-on alors une difficulté croissante à extraire ces ressources ?

Mill fut l'un des premiers à distinguer les rendements marginaux intensifs des rendements marginaux extensifs. Pour augmenter la production on peut en effet recourir à deux moyens différents : augmenter les autres facteurs de production (travail et capital) ou accroître la surface productive (cultiver plus de champs, ouvrir d'autres mines). La première solution a été attentivement étudiée par Malthus (1798) dans *An essay on the principle of population* d'où il tire la conclusion que les rendements d'un champ sont décroissants au fur et à mesure que l'on y rajoute des travailleurs. Comme d'après lui la quantité de champs est fixe, l'augmentation de la population qui croitrait à un rythme géométrique serait quotidiennement contrainte par la croissance arithmétique de la production de ressources naturelles. Les hausses de surplus de nourriture accroissent géométriquement la population et par ce biais font retomber celle-ci dans la disette et la misère. Ces travaux ont largement alimenté le versant pessimiste contemporain attaché à l'épuisement des ressources naturelles avec l'idée principale qu'au « grand banquet de la nature » il n'y a pas de la place pour tout le monde.

Le deuxième type de rendement fut approfondi par Ricardo (1817) au travers des *Principes de l'économie politique et de l'impôt*. Pour Ricardo la quantité de champs n'est pas fixe, tout comme celle de mines. On peut donc accroître cette quantité mais avec toutefois un revers : des rendements décroissants. En toute logique, par économie de coûts, l'homme cherche tout d'abord à exploiter les champs et les mines les plus productives puis basculent au fur et à mesure de l'augmentation de la demande vers d'autres moins productives. L'idée de la rente différentielle est née. Pour Ricardo, c'est les coûts de production de la dernière mine mise en production qui guide le prix. Comme les premières mines bénéficient d'une productivité accrue, leurs coûts unitaires sont plus faibles, elles tirent donc une rente égale entre la différence entre le prix de marché (égal au coût de production de la mine la moins productive) et leur coût de production. Cette rente est appelée rente différentielle car elle provient de la différence de « fertilité » entre les champs ou les mines mises en production. On voit ici que l'auteur ne distingue pas les champs agricoles des mines qui ne constituent finalement qu'une extension de son travail dans un chapitre supplémentaire (chapitre 3, *De la rente des mines*). Cette rente différentielle d'après Ricardo entrainera petit à petit la disparition du taux de profit par l'engagement de terres de moins en moins fertiles donc de moins en moins rentables

conduisant à l'état stationnaire. Cette notion reste néanmoins encore très actuelle. Aujourd'hui, le prix du pétrole génère ainsi d'importantes rentes différentielles (Figure 2-3).

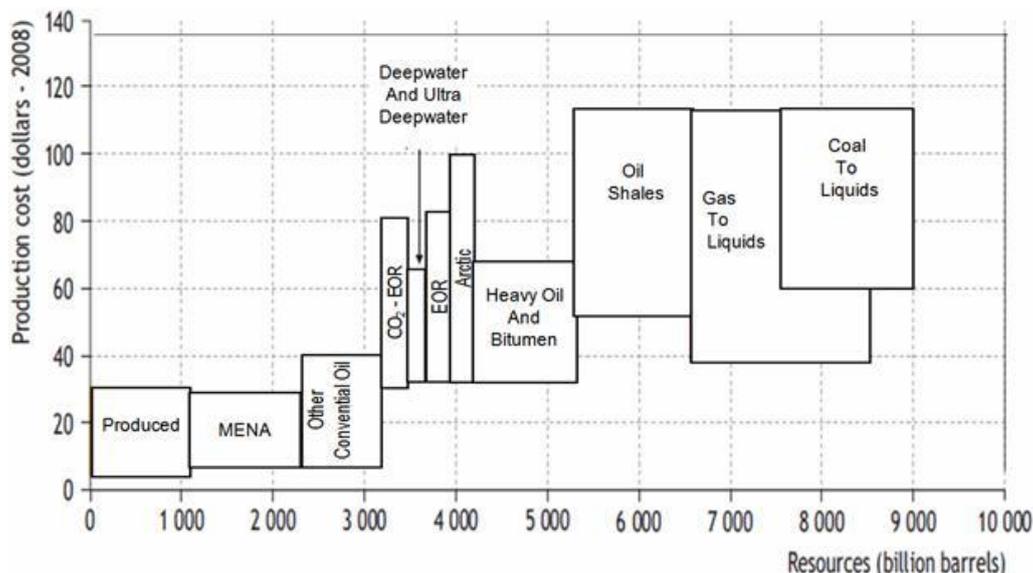


Figure 2-3 Evolution du coût de production unitaire du pétrole selon les gisements envisagés, Source : IEA (2008, p.218)

Le feu des projecteurs sur les thèses classiques les plus pessimistes ont souvent tendance à nous faire oublier d'autres auteurs qui pourtant partageait des points de vue nettement plus nuancés voir optimistes en ce qui concerne cette rareté des ressources naturelles. Parmi eux, on peut sans doute citer Smith, Carey, Marx qui défendent des facteurs reconnus aujourd'hui comme le progrès technique, l'exploration et les externalités positives liées à la croissance. Smith (1776) dans son ouvrage *Recherches sur la nature et les causes de la richesse des nations* affirme que c'est la mine la plus rentable et non pas la moins rentable comme l'affirmera plus tard Ricardo qui guide le prix. En effet, dans certaines situations de demande déprimée ou d'importants progrès technique, les mines les plus productives donc les plus compétitives peuvent pousser les autres mines moins rentables à fermer. Une théorie qui explique bien la montée en puissance des mines de terres rares chinoises et la disparition de l'exploitation commerciale du gisement américain Mountain Pass. Carey lui avance dans plusieurs de ses œuvres *Principles of political economy* (1840) et *Principles of Social Science* (1860), une idée principale : la mise en exploitation de terres plus fertiles historiquement contredisant ainsi Ricardo. Il fournit plusieurs raisons possibles :

- L'augmentation du capital et l'effet du progrès technique, ce qui toutefois ne change pas nécessairement l'ordre du classement des mines.

- La découverte de gisements de plus haute qualité ou le développement de l'accès à ces derniers.

Le positionnement de Marx sur les rendements des ressources naturelles dont il fait part dans le *Capital* (1867) est quant à lui assez similaire à Carey. Il ne croit pas aux rendements décroissants qui peuvent être combattues par :

- L'amélioration des communications qui peut mener à exploiter des sols de meilleure qualité.
- Le développement des sciences naturelles ou agronomes ou de moyens permettant de surmonter les obstacles physiques et conduisant à convertir un sol de mauvaise qualité en terre fertile.
- Les changements institutionnels qui peuvent rendre disponible des terres de bonne qualité auparavant occupées.
- L'extension des sols en production qui peut amener à mettre en production des sols de bonne qualité dans certaines situations.

Les auteurs que nous aborderons ensuite ont préféré aborder la notion de rente et son origine. Mill introduit ainsi pour la première fois dans *Principles of Political Economy* (1848), la différenciation entre l'activité minière et l'activité agricole. Cette différence s'explique par l'antagonisme entre production future et production présente dans le cas de la mine. Mill marque ainsi les prémises de l'analyse d'optimisation intertemporelle néoclassique qui naîtra au début du XX^{ème} siècle. Bien qu'il estime que la diminution du rendement lorsque la production cumulée augmente est davantage perceptible dans l'exploitation minière qu'en agriculture, la production minière bénéficie davantage d'améliorations mécaniques, de nouveaux procédés, et de nouvelles découvertes. De manière générale, Mill adhère à la thèse de Ricardo selon laquelle on recourt de plus en plus à des ressources inférieures (rendements moindres), mais il accepte que ce tendance puisse être interrompu ponctuellement par la découverte de nouvelles mines plus efficaces. La pensée de Mill traduit aussi la présence d'un état stationnaire inéluctable mais à l'inverse de Ricardo et Smith, l'auteur se félicite de cette issue qui permettra aux individus de se détourner de l'accumulation des richesses au profit d'autres activités comme l'art, l'éducation, le sport ou la religion.

Plus tard, Sorley dans son article, *Mining Royalties and their effect on the iron and coal trades* (1889) perpétue l'œuvre de Mill, notamment grâce à son travail sur l'existence d'une rente affectant les mines et l'agriculture. La nature de la rente d'une mine est constituée par

son caractère épuisable. Contrairement à la ferme, la mine est détériorée suite à son utilisation, ce qui exige des royalties en compensation. Il parvient donc à la conclusion que la rente de la mine n'est pas déterminée de la même manière que la rente de la ferme. La différence entre ressources épuisables et ressources renouvelables apparaît ici au grand jour. En autorisant l'exploitation de sa mine le propriétaire de la plus mauvaise mine perd une possible source de revenu future, et doit donc être dédommagé en retour. Cette dernière affirmation éclaire la nécessité de l'existence d'une rente même lorsque la mine est marginale à la production.

Enfin, Marshall qui appartient plutôt à l'ère des marginalistes prolonge l'analyse classique en ressources naturelles au travers de *Principles of Economics* (8^{ième} éd, p.364) :

« But the royalty itself on a ton of coal when accurately adjusted represents that diminution in the value of the mine, regarded as a source of wealth in the future, which is caused by taking the ton out of nature's storehouse. »

On distingue très nettement dans cette citation l'idée centrale d'Hotelling et Gray, celle du profil intertemporel de production d'une ressource épuisable mais également de la valeur de la ressource en terre ici désignée par l'entrepôt de la nature. L'usage d'une tonne de charbon supplémentaire via son extraction entraîne une perte future de revenu et la diminution de la valeur de l'entrepôt de la nature, ce qui doit être compensée par une rente d'usage (*user costs*) ou rente de rareté. L'intérêt est là, il ne manque plus qu'aux fondateurs du courant Hotellinien de détailler dans les formes le principe de cette approche.

3 L'épuisement des ressources naturelles, un enjeu pour l'Etat et les entreprises

3.1 L'insuffisance de la réponse technologique face aux comportements économiques : Le paradoxe de Jevons

L'oeuvre de Jevons, *The coal question* (1865) souvent classée dans le courant marginaliste, s'inscrit surtout dans une toute nouvelle perspective qui mérite d'être davantage détaillée. Tout d'abord, contrairement aux autres économistes, le travail empirique de Jevons est au carrefour de plusieurs sciences (l'économie, la géologie et les techniques de l'ingénieur). Il initie donc pour la première fois une approche interdisciplinaire de l'épuisement des ressources naturelles dans la pure tradition de l'économie écologique (Missemer, 2012).

Son innovation repose aussi sur l'identification de l'effet rebond aussi nommé le paradoxe de Jevons. Cet effet rebond constitue un frein considérable au pouvoir de la technologie comme rempart à l'épuisement des ressources naturelles. Celui-ci empêche de bénéficier de la totalité des gains d'efficacité incrémenté par le progrès technique voire même l'annule en totalité. C'est en réalisant un formidable travail empirique que Jevons s'aperçoit qu'un progrès technique concourant à améliorer l'efficacité technique d'usage du charbon ne peut avoir lieu là où le charbon est bon marché. En d'autres termes, sa vision est déjà celle du progrès technique endogène. Seulement une hausse du prix de la ressource motivant de l'efficacité d'usage via le progrès technique ne permettra pas de nous sauver de la rareté du charbon car il assure :

« *They* (à propos des gens qui perçoivent la technologie comme la solution) *forget that economy of fuel leads to a great increase of consumption.* » Préface p. XXXIV

Jevons rappelle que le progrès technique entraîne certes des baisses du prix de la ressource en l'économisant, mais celle-ci conduit aussi immédiatement à une augmentation de sa consommation via l'effet revenu des agents économiques. Cette idée a trouvé un écho très important car elle se vérifie dans beaucoup de situations actuelles. Jevons annonce ensuite ce fait empirique très important étayant sa thèse :

« *It's a wholly a confusion of ideas to suppose that the economical use of fuel is equivalent to a diminished consumption.* » p.140 chapter VII.

En effet, aujourd'hui nos voitures par rapport à 1950 consomment deux fois moins d'essence par distance parcourue. Dans le même temps, la distance parcourue en voiture par personne a été multipliée par 10. Loin d'avoir permis la diminution de la consommation, le progrès technologique a plutôt encouragé à prendre davantage la voiture donc à créer une consommation qui n'existait pas avant. Ce phénomène de modification des comportements suite à des gains technologiques conduit Jevons à établir des conclusions très pessimistes sur l'avenir du charbon en Angleterre. La demande ne cessera pas d'augmenter tandis qu'il deviendra de plus en plus difficile d'extraire du charbon. Le progrès technologique entraîne, via l'effet rebond, davantage de consommation de charbon mais aussi d'autres ressources naturelles de façon indirecte. Jevons prédit donc, non pas la fin de la croissance mondiale (comme le suppose les mouvements écologiques actuels), mais la perte de compétitivité des industries anglaises fondées sur une énergie compétitive à bas coût.

Nous arrivons par cette entremise aux limites des travaux de Jevons mis en lumière par Gaudet (1984). Tout d'abord, l'exercice de Jevons mobilise une approche prospective évaluant les possibilités de substitution du charbon par d'autres énergies (p.162). Il parvient sans surprise à des conclusions qui prêtent à sourire aujourd'hui. Néanmoins, anticiper les ruptures technologiques passées aurait nécessité des facultés quasi-divinatoires. Il exclut ainsi au cours de cet exercice, la géothermie qui semble inaccessible, entrevoit un avenir très marginal à l'hydraulique qui devra se cantonner à l'approvisionnement du voisinage, et note que les énergies renouvelables (vents et solaire) sont intermittentes et très peu concentrées. L'hydrogène n'a pas la capacité énergétique volumique suffisante tandis que le pétrole reste contraint par une offre naturelle très limitée. De même, Jevons n'entrevoit pas la formidable poussée des capacités de l'électricité et l'hégémonie à venir du pétrole. De la même façon, il évalue mal cette notion dynamique des réserves qui évoluent en fonction du prix, de la technique et des connaissances géologiques. Bien qu'ayant constaté par le passé la baisse des coûts d'extraction du charbon grâce au progrès technique, Jevons prédit un ralentissement du progrès technique dont les rendements seraient comme la nature, décroissants (p.150). On perçoit ici l'influence malthusienne et plus généralement du courant classique. Renforçant encore sa filiation à l'héritage malthusien, Jevons évoque l'existence d'une loi naturelle de la croissance sociale qui devrait pousser les conditions économiques et sociales à progresser de façon exponentielle. Comme la ressource en charbon est finie, cette croissance va très rapidement trouver une limite. Gaudet (1984) très critique sur ce genre d'extrapolation montre qu'elle conduisit Jevons à cent ans d'intervalle à surestimer la production par un facteur 13. La Figure 2-4 montre à quel point l'extrapolation est un exercice périlleux. Une extrapolation de la production mondiale de cuivre en 1910 aurait amené à surestimer la production actuelle par plus de 10. Néanmoins la précision de la prévision s'améliore avec la connaissance du passé, l'erreur passant ainsi d'un facteur 10 à environ 6% de la production actuelle quand on multiplie par 10 l'intervalle de temps disponible pour effectuer l'extrapolation.

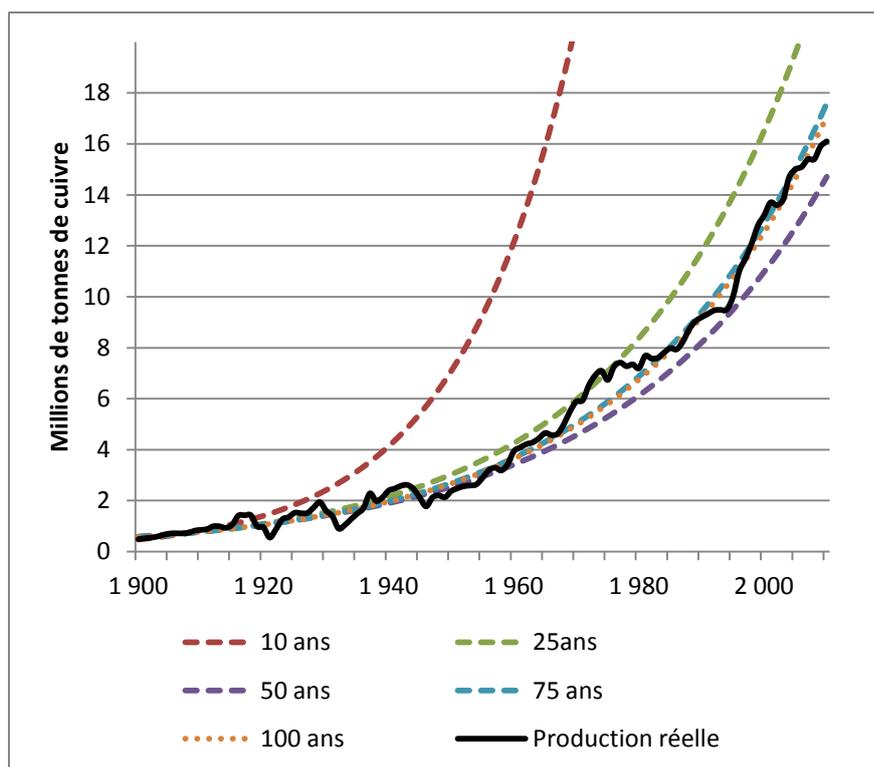


Figure 2-4 Extrapolation de la production de cuivre à différents intervalle de temps. Source : données USGS, calculs de l'auteur

On peut aussi reprocher à Jevons de n'avoir pas su élargir son analyse au monde entier et de considérer l'épuisement uniquement comme une simple dégradation de la compétitivité nationale.

D'une façon plus générale, les travaux de Jevons restent limités à plusieurs égards, notamment en ce qui concerne la compréhension de l'offre des ressources naturelles, mais ils ont permis de souligner la liaison complexe qui unissait deux facteurs importants de l'épuisement des ressources, le progrès technique et la demande.

3.2 Le mouvement de conservation

Le mouvement de conservation (*Conservation Movement*²²) est un courant ayant émergé et connu son principal essor à la fin du XIX siècle aux Etats-Unis, bien que d'autres idées similaires aient pu être lancées de façon plus précoce en Europe. Les initiateurs de ce mouvement sont principalement des figures politiques ou sociales voire des scientifiques des sciences naturelles (Tilton, 2003). Ce courant est donc l'un des tout premiers à s'intéresser à l'épuisement des ressources naturelles sous un angle non économique. Ce premier courant soulève la difficile question de la gestion et l'équité intergénérationnelle des ressources

²² Une synthèse très complète du mouvement est fournie dans Barnett et Morse (1963).

naturelles. Ils s'interrogent sur la soutenabilité du système, ce qui sera plus tard le fer de lance du développement durable. Dans cette optique, la célèbre citation de Gifford Pinchot (1910) dans *The Fight For the Conservation* illustre particulièrement sa position de précurseur :

«*Conservation means the wise use of the earth and its resources for the lasting good of men* ».

Les partisans du mouvement de conservation se posent en opposition au courant du *laissez-faire* autorisant les propriétaires des compagnies minières et forestières à disposer et exploiter comme ils le souhaitent les ressources naturelles. Leurs principales actions se traduisent par l'intervention du gouvernement pour gérer les ressources naturelles. C'est au travers de trois figures nationales (Muir, Pinchot et Roosevelt) que le mouvement de conservation marque le plus les esprits. Joseph Muir naturaliste de profession est particulièrement impressionné par la beauté associée à la chaîne de montagne des Yosemite et rédige suite à cela plusieurs articles centrés sur la dévastation des prairies montagneuses par les moutons et le bétail. En 1892, il fonde le *Sierra Club*, un club très actif destiné à dénoncer et faire cesser les dégradations de l'homme à l'environnement. Sa vision influence particulièrement le président Roosevelt au travers de l'ouvrage *Our National Parks* (1901).

Pinchot crée de son côté l'*US Forest Service* et la *Society of American Foresters*. Cette organisation conduit à l'ajout de millions d'acres de forêts aux forêts nationales dont l'exploitation est contrôlée et régulée par l'Etat.

Troisième figure tout aussi importante, Théodore Roosevelt fait preuve durant son mandat de président (1901-1909) de sa préoccupation concernant la surexploitation des forêts, le contrôle des sources d'eau, l'effondrement des populations animales, l'expansion des industries minières et d'autres conséquences de l'activité de l'homme. Sa principale mesure en faveur du mouvement de conservation repose sur la création de cinq parcs et de monuments nationaux (et dans lesquels figure le Grand Canyon).

Au final, le mouvement de conservation marque une rupture à plusieurs points de vue dans l'histoire de la théorie de l'épuisement des ressources naturelles. Tout d'abord, il introduit la question de l'équité intertemporelle mais instaure également une rupture dans l'origine disciplinaire de la méthodologie. Ce courant délaisse ainsi l'approche économique pour celles des sciences naturelles. Enfin, il rompt avec la tradition économique par sa volonté régulatrice : les entreprises privées ne seraient pas suffisamment responsables pour gérer des stocks de ressources naturelles, il faudrait donc que l'Etat intervienne afin de préserver ces

ressources pour les générations futures. Une position très tranchée qui influencera particulièrement les auteurs du courant suivant, qui s'occuperont à démontrer que les entreprises sont à même de gérer des ressources épuisables en intégrant le temps.

3.3 La rupture Hotellinienne : la prise en compte du temps dans la théorie économique

La rupture introduite par Hotelling mais aussi par d'autres auteurs de la même époque (Gray et Cassel par exemple) repose sur la mise en lumière du comportement du producteur dans sa gestion d'une ressource épuisable. Ces auteurs contemporains de la mise sous tutelle de plusieurs types de ressources naturelles par l'Etat sous l'impulsion du mouvement de conservation s'interrogent sur le bien fondé de telles pratiques. Cette influence du mouvement de conservation est très claire dans l'article de Hotelling (1931, p.137) :

« Contemplation of the world's disappearing supplies of minerals, forests, and other exhaustible assets has led to demands for regulation of their exploitation. The feeling that these products are now too cheap for the good of future generation, that they are being selfishly exploited at too rapid rate and consumed wastefully has give rise to the conservation movement. »

Ces questions d'équité intergénérationnelle initiées par le mouvement de conservation vont à partir des travaux d'Hotelling susciter des interrogations chez ses successeurs (Néo-Hotelliniens). Beaucoup d'auteurs actuels citent souvent l'article de Hotelling comme l'article séminal ayant engagé les premiers travaux sur la question de l'extraction intertemporelle d'une ressource épuisable. En réalité, deux auteurs au moins ont réalisés des réflexions antérieures à Hotelling sur cette thématique, Gray (1914) mais aussi Cassel (1923).

Gray (1914) établit le profil d'utilisation optimal d'une mine avec une ressource épuisable. Même si sa thèse n'est pas portée au niveau global comme le fera Hotelling plus tard, il dégage la plupart des points principaux de l'extraction intertemporelle d'une ressource épuisable. Il introduit de façon claire le principe de valeur actuelle d'une mine que le producteur se doit de maximiser (1914, p. 470) :

« The owner of a valuable coal deposit, for instance, desires to derive the maximum benefit from the limited supply which he owns. If for any reason less benefit can be derived by immediate removal and sale of the coal than by waiting until some future time, it may be profitable to postpone utilization. »

Il démontre aussi par une analyse chiffrée détaillée le profil de production intertemporel optimisé d'une mine de charbon (1914, p.479). Bien qu'il n'explique pas clairement la règle d'Hotelling, l'importance du taux d'intérêt dans la détermination de ce profil de production intertemporel est soulignée par Gray (1914, p. 474). Enfin, Gray apporte des éléments d'éclairage sur l'impact des politiques publiques fiscales sur le profil intertemporel de production d'une ressource épuisable. Il distingue trois types de taxes : une taxe annuelle, une taxe unitaire affectée au tonnage, et une taxe sur le profit de la mine. Les deux premières affectent le profil de production de la mine, la première accélérant la production, la seconde au contraire la ralentissant. Cet effet est explicable par l'impact de l'actualisation sur ces taxes. Une taxe annuelle par exemple va réorienter la production vers le présent et raccourcir la durée d'exploitation pour réduire le montant de taxe à payer. Une taxe unitaire va réduire la production présente car cette taxe réduit moins le rendement net futur que le rendement net présent en raison du taux d'actualisation. La troisième catégorie de taxe ne devrait pas altérer le chemin optimal de production en supposant qu'elle soit considérée comme permanente par le producteur.

Gustav Cassel dans son ouvrage *The Theory of Social Economy* (1923) reprend l'analyse de Gray sur plusieurs points. Comme Gray il estime que la valeur de la mine en place est égale à la valeur actuelle des flux futurs de profits. Le profit d'une mine est partagé entre une valeur capitalisée et une charge de dépréciation. Au début de la vie de la mine, une grande part du revenu provient de l'intérêt tandis qu'après la plus grande part provient de la dépréciation de la mine. Dans le cas d'un bien durable à très longue vie, l'essentiel du revenu provient de la valeur capitalisée, ce qui est proche d'une rente. La rareté future implique une plus ou moins croissance uniforme des prix de la ressource dans le temps. Cassel souligne aussi l'hypothèse d'arbitrage intertemporel : si le producteur anticipe une rareté croissante de sa ressource dans le futur, il pensera que les prix seront plus élevés dans le futur donc il réduira sa production pour maximiser sa valeur actuelle nette. En réduisant sa production, il fera monter le prix actuel de la ressource à un niveau supérieur, reflétant mieux les anticipations de prix futurs des agents. Il explique aussi comment le taux d'intérêt joue sur le profil de production d'une ressource épuisable. Ainsi, une montée du taux d'intérêt va pousser le producteur à produire davantage dans les premières périodes en réduisant l'intérêt des flux futurs de revenu actualisés. Il va même jusqu'à discuter la possibilité de l'incertitude qui a tendance d'après lui à renforcer la préférence du présent par rapport au futur. Anticipant encore les travaux d'Hotelling, il s'interroge sur l'effet d'un contrôle du marché par un monopole. Il considère

qu'un monopole en restreignant la consommation présente, sécurise davantage les intérêts de la consommation future. Quant aux effets d'une intervention étatique, il suggère qu'établir des taxes ou des quotas à l'exploitation vont accroître la rareté actuelle de la ressource et donc servir les intérêts des besoins futurs. Cassel suppose globalement des rendements marginaux décroissants extensifs. Il n'exclut cependant pas qu'il existe parfois des circonstances où l'on peut trouver des nouvelles terres autant ou plus efficaces que celles en production, notamment via le progrès technique qui peut conduire à rendre des nouvelles terres exploitables à des coûts identiques voire moindres que celles déjà cultivées.

Pour terminer, Hotelling (1931) apporte pour la première fois une analyse formalisée de l'exploitation d'une ressource épuisable. Il parvient sous un jeu d'hypothèses assez restrictif à la règle d'Hotelling qui implique que le prix d'une ressource épuisable doit croître au taux d'intérêt. Il démontre aussi le chemin d'extraction intertemporel optimal d'une ressource épuisable.

Pour obtenir ces résultats Hotelling suppose explicitement plusieurs hypothèses fondamentales²³ :

- Le volume du stock est connu.
- La demande de la ressource cumulée au cours du temps épuise tout juste le gisement. La demande est une fonction décroissante du prix de la ressource, qui s'annule à la date T.
- Le cadre de la concurrence pure et parfaite est respecté.
- Il n'existe pas de coûts affectant la production.
- Le taux d'actualisation est constant dans le temps.

D'autres hypothèses plus réalistes seront intégrées plus tard par les néo-Hotelliniens.

L'hypothèse centrale d'Hotelling consiste à considérer le producteur d'un stock de ressources comme un gestionnaire d'actifs. La valorisation dans le temps du stock d'une ressource en terre doit rapporter un rendement au moins égal aux autres actifs du marché. Le rendement attendu d'une unité de ressource du stock nette du coût d'extraction doit être dans ces conditions égal au taux d'intérêt. Cela garantit par conséquent qu'en équilibre le prix net des coûts d'extraction d'une ressource épuisable doit croître au taux d'intérêt. En supposant nuls

²³ Les conséquences attachées à la modification de ces hypothèses fondamentales sont très bien analysées dans Pearce et Turner (1990), chapitre 18, pp. 271-287.

les coûts d'extraction, nous pouvons assimiler dans cette situation le prix à la rente de rareté. Concernant le chemin d'extraction optimal, Hotelling considère dans un premier temps, une demande linéaire. Le prix évoluant au taux d'intérêt, la hausse régulière du prix finit par éteindre la demande. Le chemin de production est donc continuellement décroissant jusqu'en T , date de l'épuisement. Dans le cas d'une demande non linéaire, avec une élasticité constante par exemple, l'épuisement du gisement est atteint de manière asymptotique. L'existence d'une rente de rareté s'explique par le caractère fini de la ressource impliquant un rationnement dans la demande dans le temps car celle-ci est supérieure à l'offre cumulée totale possible.

Le rôle du taux d'intérêt apparaît comme central chez Hotelling puisqu'il guide le rendement à atteindre pour le stock de ressources naturelles. Par conséquent un taux d'intérêt plus élevé implique un chemin de prix de la ressource évoluant plus rapidement et donc une demande éteinte plus rapidement. Un taux d'actualisation plus élevé entraîne donc pour Hotelling un avancement de la date d'épuisement de la ressource et une extraction plus rapide. Au contraire une diminution du taux d'intérêt ralentit la vitesse d'extraction de la ressource et recule la date d'épuisement de la ressource.

Hotelling accorde également son attention à la production d'une ressource naturelle en monopole. Bien qu'il n'explique pas clairement la règle d'optimalité régissant le monopole propriétaire d'une ressource naturelle comme le fera Stiglitz (1976), il parvient à la conclusion qu'il y a une tendance générale du monopole à retarder la production d'une ressource naturelle épuisable. S'il ne parvient pas à des résultats concluants, Hotelling s'interroge aussi sur l'influence de la production cumulée à la fois sur la demande et sur les coûts. On peut donc y voir les prémisses de la volonté de modéliser un effet de stock où les coûts dépendent de la production présente mais aussi de la production cumulée.

Enfin, Hotelling n'échappe pas à la règle en consacrant la dernière partie de sa réflexion à l'impact de la politique fiscale sur l'extraction d'une ressource épuisable. Comme Gray (1914), il envisage deux types de taxes, une taxe annuelle (« Capital tax value ») basée sur la valeur de la mine et une taxe unitaire (« severance tax ») affectant chaque tonne de ressource extraite. D'après Hotelling, la première taxe conduit à des effets similaires à une hausse du taux d'intérêt, elle accélère l'extraction. Ce résultat suppose que la taxe soit anticipée par les agents car une taxe non anticipée par les agents n'aura pas cet effet. Au contraire une taxe unitaire force le propriétaire de la mine à ralentir la vitesse d'extraction de la ressource via l'effet de l'actualisation qui réduit le poids de la taxe dans le futur.

Hotelling à conscience des hypothèses très fortes nécessaire à son modèle et explique que ces résultats ne doivent pas être une justification au *laissez faire*, car il existe dans l'industrie minière des conditions particulières (comme l'incertitude en exploration) pouvant conduire à d'immenses gâchis de ressources donc à des situations non optimales (1931, p.144).

4 Les remises en causes avant-gardiste de l'épuisement en période de croissance

4.1 *Le pic de Hubbert : les phénomènes géologiques comme facteur explicatif et prévisionnel de l'épuisement*

La courbe de Hubbert en forme de cloche demeure l'une des thèses sur l'épuisement les plus vulgarisées à ce jour dans le grand public. En effet, la théorie du « *Pic Oil* » continue à alimenter la presse et les commentaires des grandes institutions internationales comme l'IEA (2010a).

Hubbert est un géologue de formation et il avance pour la première fois en 1956 l'idée d'un pic pétrolier au niveau de la production américaine lors d'un meeting de l'American Petroleum Institute. Cette idée de courbe logistique est un emprunt à des modèles de biologie, où le taux de croissance de la population dépend linéairement de la proportion inoccupée de l'environnement. Il situe alors le pic pétrolier entre 1965 et 1970. Cette prévision s'avéra précisément juste puisque la production américaine des 48 Etats connu un pic en 1970 et chuta ensuite.

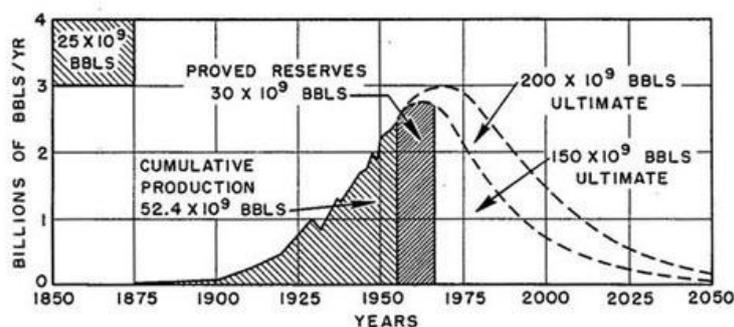


Figure 2-5 Prévision d'Hubbert sur la production américaine en 1956, Source : Hubbert (1956)

Nous pouvons distinguer plusieurs méthodes différentes pour identifier la thèse d'Hubbert. La première méthode établie en 1956, consiste à déterminer avec la production actuelle, les quantités ultimes recouvrables ; et partant de là, la date du pic de production, survenant lorsque la moitié des réserves ont été consommées (Figure 2-5). Bien que ce résultat implique plusieurs pages de calculs différentiels, il est désormais possible de l'obtenir par la technique

de linéarisation d'Hubbert (1982). Cette nouvelle voie de calcul requiert simplement une régression linéaire entre le ratio de la production sur production cumulée et la production cumulée pour obtenir via une extrapolation linéaire les réserves ultimes. Une seconde méthode reposant sur l'observation d'un pic des découvertes, le conduit à percevoir une correspondance entre les découvertes cumulées et la production cumulée. A partir de là, il envisage un pic de production vingt années après la survenue du pic de découverte (Hubbert, 1962). Enfin, dans une dernière méthode (Hubbert, 1967), le géologue s'est intéressé à la quantité de pétrole découverte par forage en fonction de la quantité de découvertes cumulées. Il identifie à nouveau un schéma dans cette évolution auquel il associe une fonction de type exponentielle décroissante.

Il y a cette idée centrale que la capacité de l'homme à produire du pétrole dépend linéairement des quantités totales restantes à produire comme le souligne Deffeyes (2005, p.39). L'application de cette méthode au cuivre, nous conduit à prédire des ressources ultimes recouvrables de 1,925 Gt (Figure 2-6). Nous avons consommés sur cette quantité totale environ 558 Mt soit environ 29%. Il nous reste donc en théorie, 1,366 Gt de cuivre soit un montant supérieur aux réserves considérées par l'USGS (2012) évaluées à environ 0,69 Gt. L'évaluation du pic de cuivre par la méthode nous conduit à le fixer en 2034, à un niveau d'environ 18,5 Mt sachant que nous produisons aujourd'hui un peu plus de 16,4 Mt par an (Figure 2-7).

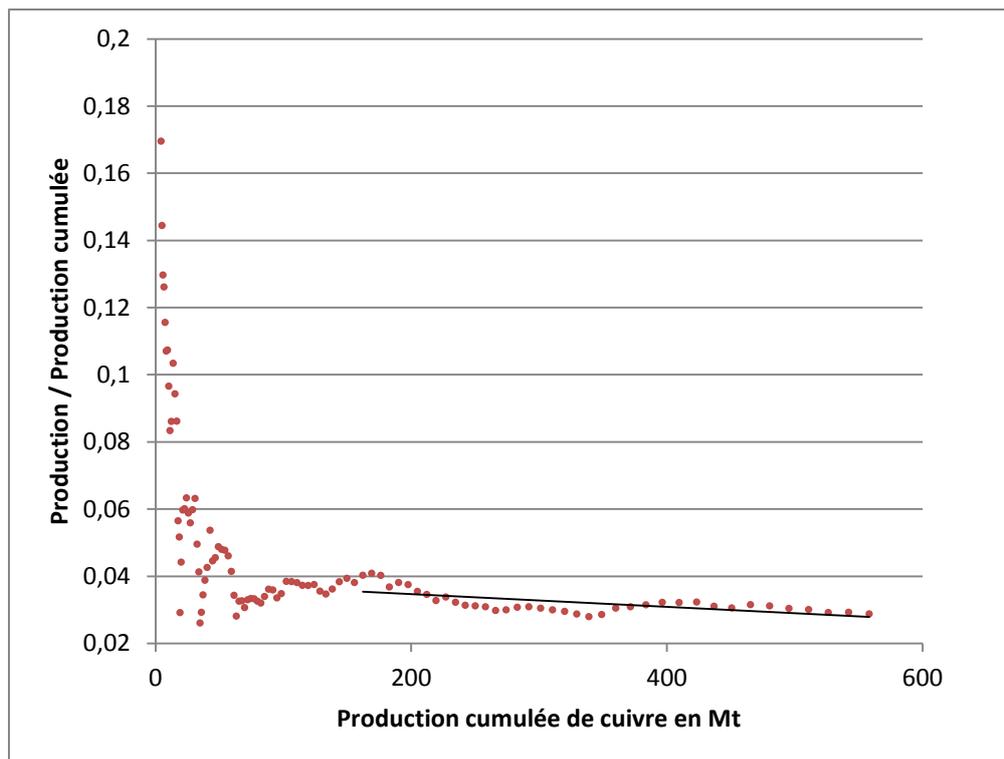


Figure 2-6 Technique de linéarisation d'Hubbert, prévision des ressources ultimes de cuivre. Source : données USGS et calculs de l'auteur

Les prévisions du pic pétrolier ont été aussi réalisées au niveau mondial par Hubbert (1969) le plaçant en 2000 tandis que Deffeyes (2005) le prévoit en 2005. L'IEA (2010) a officiellement reconnue l'existence de ce pic pétrolier et le situe en 2006²⁴. L'ASPO (Association for the Study of Peak Oil) le localise plus tardivement, c'est à dire entre 2010 et 2015. D'autres agences, foncièrement plus optimistes, ont délivré des résultats envisageant le pic à des horizons plus lointain, 2036 pour l'USGS (2000) et 2037 en hypothèse moyenne pour des experts du DOE (Department of Energy) américain. Ces écarts de prévision peuvent s'expliquer à la fois par des méthodes différentes et par la nature du pétrole envisagé. Hubbert et Deffeyes par exemple ne prennent pas en compte les pétroles non conventionnels lorsqu'ils débattent sur la date du pic pétrolier.

Bien que plusieurs économistes ont montré le pouvoir de prédiction du pic d'Hubbert (Reynolds et Baek, 2012), les courants économiques manifestent principalement deux types de réactions face à cette théorie. Il y a ceux qui réfutent la méthode pour des raisons multiples et variées, mais surtout pour son absence de fondements économiques et la construction ad-hoc de la courbe (Hemmingesen, 2010). En effet, Hubbert mais aussi Deffeyes (2005, p.41) se

²⁴ L'IEA évoque l'existence d'un pic de production pour le pétrole conventionnel.

sont toujours défendu d'associer d'importants sous jacents économiques à la construction de leur courbe :

« Because it (à propos de la courbe) does fit, the possibility arises that the underproduced fraction of the total oil dominates over all other factors. Of course, the price of oil matters; it just doesn't matter very much ».

On a aussi reproché l'absence de progrès technique dans le modèle d'Hubbert, ce à quoi rétorque Deffeyes que le progrès technique est pris en compte via la progression de la production qu'il a déjà produit dans le passé. Deffeyes suppose donc un effet progressif et continu du progrès technique.

Deux auteurs (Cleveland et Kaufman, 1991) bien qu'admettant que la véracité des prédictions d'Hubbert se sont avérées étonnamment stables malgré les crises, les innovations technologiques et les interventions gouvernementales, évaluent le modèle d'Hubbert comme mal spécifié. En effet, une déclinaison exponentielle implique que les champs de pétrole sont découverts dans un ordre strictement décroissant de taille, ce qui n'a pas été le cas dans la réalité²⁵. Le modèle de Cleveland et Kaufman est une forme plus généralisée du modèle d'Hubbert (1967), où on a intégré également l'effet du prix de la ressource et du niveau d'effort d'exploration pour chaque année. Les auteurs parviennent de cette manière à une forme beaucoup plus proche des découvertes empiriques. Toutefois leurs conclusions (1991, p. 29) restent identiques à celle d'Hubbert quant à la possibilité d'une stabilité du niveau de découvertes grâce aux facteurs économiques :

« After including these effects, there is no evidence that physical characteristics of the resource base generate a plateau-type pattern in YPE, or that the long run monotonic decline in YPE has been arrested or reversed ».

Enfin, les détracteurs de la thèse d'Hubbert ont aussi contestés la symétrie de la courbe logistique prétextant que la montée du prix dans la période post-pic stimule le progrès technique et accroît le nombre de gisement rentable et par conséquent réduit la vitesse de décroissance de la production pétrolière. Les économistes penchent donc vers une courbe biaisée vers la droite alors que Kaufman trouve exactement l'opposé en maintenant tout les facteurs constants. La charge la plus virulente portée contre la théorie d'Hubbert est très certainement à l'initiative de Boyce (2013). Cet auteur a montré que d'autres types de

²⁵ Le plus grand gisement de pétrole a été découvert dans les années 30.

phénomènes (production constante, exponentielle, géométrique) peuvent conduire au même type de données empiriques sans pour autant induire des courbes en forme de pic. Le modèle d'Hubbert est incapable de discerner un processus ayant une fin (ressource épuisable) d'un processus n'ayant pas de limite (ressources agricoles). De manière générale, le modèle d'Hubbert et ses variantes est mal spécifié et force des données non linéaires à adopter une forme linéaire via une sélection de données *a posteriori* non justifiée. Enfin, les qualités prédictives *out of the sample* du modèle sont de très mauvaise qualité et conduisent à une sous estimation systématique des ressources ultimes et cela quelque soit le niveau de désagrégation choisi.

D'autres économistes, au contraire, se sont efforcés de démontrer que la courbe de Hubbert était une autre façon de percevoir les travaux d'Hotelling. L'auteur notait d'ailleurs dans son papier séminal (1931, p.165), la possibilité d'une telle courbe en cloche en considérant l'influence d'investissements fixes et la présence de coût d'accélération de la production au départ de l'extraction. Plus formellement, trois façon de relâcher les hypothèses restrictives du modèle d'Hotelling suffisent à obtenir ce type de courbe en cloche : un effet d'exploration (Pindyck, 1978), de réduction des coûts via le progrès technique (Slade, 1982) ou d'un effet d'information (Reynolds, 1999). Seulement, ces courbes de production en cloche sont obtenues via un effet prix sur la demande, ce qui ne correspond pas aux faits réels. La demande aujourd'hui peut suivre le prix c'est la production qui ne peut se permettre de progresser. C'est pourquoi, Reynès et al. (2010) ont démontré la possibilité d'une telle courbe via une évolution du niveau de profitabilité en U renversé. Pour cela, ils supposent que les prix des inputs de l'entreprise productrice suivent une courbe en U ou qu'un effet d'épuisement du stock soit relié négativement aux coûts.

On décrit souvent Hubbert comme un prédicateur d'apocalypse et de lendemain déchantant mais on oublie qu'Hubbert mettait en avant les possibilités de substitution du pétrole par le nucléaire dans ses articles originaux. C'était d'ailleurs l'intérêt principal du pic pétrolier, souligner la possibilité de substitution à long terme. Même si comme le précise Deffeyes (2005), la transition économique à moyen et court terme demeure un important défi.

De manière générale, Hubbert a permis l'identification d'un schéma de production qui semble correspondre particulièrement aux données empiriques. On peut toutefois regretter que sa méthode est très sensible à la date à partir de laquelle on effectue la linéarisation mais aussi au nombre de données dont on dispose (Roberts et Torrens, 1974). Ainsi les prévisions du pic

s'avèrent radicalement différentes suivant qu'on se place à un horizon très proche ou très lointain du pic. La faiblesse du sous jacent théorique de la thèse d'Hubbert limite son application à une sphère plus généralisée des ressources épuisables même si d'autres auteurs ont effectué des tentatives dans ce sens pour le charbon, le cuivre et les phosphates (Mohr et Evans, 2009 ; Roberts et Torrens, 1974 ; Cordell et al., 2009). La nature géologique des réservoirs de pétrole peut-elle être répliquée et étendue à d'autres ressources comme les minerais ou les métaux ? Cela semble peu probable. De la même manière, le recyclage est un autre facteur qui suffit à distinguer les métaux des ressources énergétiques et rend l'extension du modèle de Hubbert difficile.

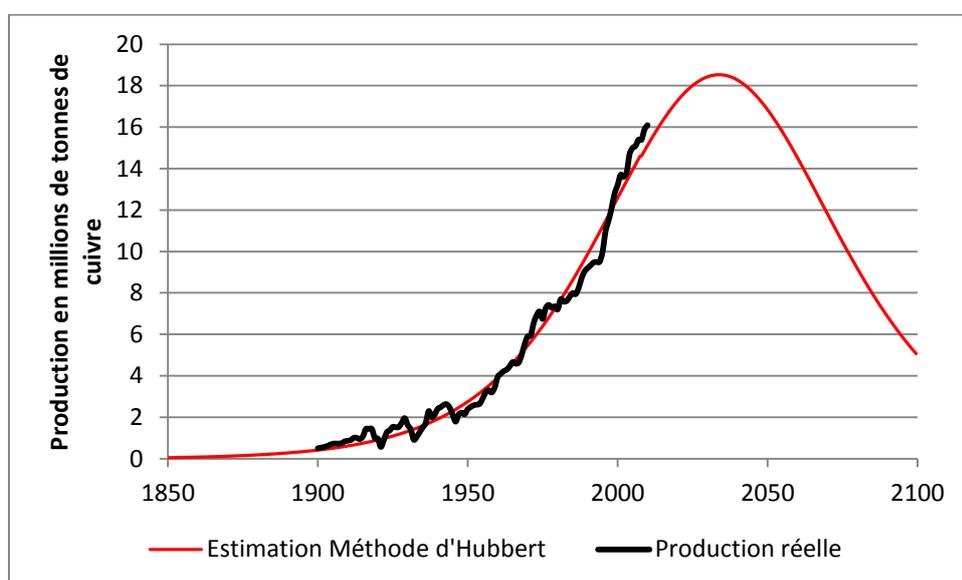


Figure 2-7 Linéarisation adaptée au cas du cuivre. Source : données USGS et calculs de l'auteur

4.2 Paul Ehrlich : Le renouveau des thèses malthusiennes remis au centre de l'écologie
 Ehrlich incarne au travers de *The Population Bomb* (1968), le renouveau de la thèse malthusienne qu'il rédige avec d'autres membres du Sierra Club. Il investit la population comme principal facteur limitatif de la poursuite de la course humaine. Il milite à ce titre pour une réduction de la population humaine (à cette époque aux alentours de 3,5 milliards d'homme) qui dépasse « la charge utile » de la terre. Cette charge utile est d'ailleurs très imprécise, il l'évalue à 500 millions d'homme (p.76, la bombe « P », 1971) mais ne repousse pas l'hypothèse raisonnable d'un milliard d'homme si les ressources sont gérées avec parcimonie (p. 233). En 2009, il avance un chiffre plus important de 1,5 à 2 milliards d'hommes.

Il montre au travers d'extrapolation que la course démographique va bientôt devoir s'arrêter. Le temps de doublement de la population au travers de l'histoire est passé de 1 millions d'années, à un millénaire puis à deux centenaires pour finir à l'époque où il écrit au chiffre de 37 ans. A ce rythme qui correspond à un taux de croissance démographique d'un peu moins de 2% par an, la population atteindrait dans 900 ans le chiffre de 60 millions de milliards (6×10^{16}) ! Soit 120 hommes par mètre carré, espace des océans compris. Bien entendu, ce calcul vise à montrer que même si on mettait de côté le problème des ressources naturelles, l'espace finirait par manquer.

Pour lui le « problème » de la surpopulation finira par se régler, soit par un effet natalité (diminution du taux de natalité) soit par un effet mortalité (augmentation du taux de mortalité) via des guerres, des famines, des épidémies. Il faudrait donc réduire fortement la population via une restriction des naissances ou s'exposer à un futur quasi apocalyptique (décrite dans des scénarios).

La thèse des auteurs classiques se dégagent d'ailleurs très nettement lors de certains passages, que ce soit Malthus :

« Nous savons maintenant qu'il est impossible d'accroître la production de nourriture à une cadence telle qu'elle suive l'accroissement de la population. » (p. 152)

Ou Ricardo :

« Au fur et à mesure que s'installait la famine, les lois de l'offre et de la demande se firent sentir dans les pays sous-développés. Les prix se mirent à monter. Les terres marginales furent mises en exploitation avec évidemment un faible taux de production par hectare. » (p. 40)

Une grande partie de l'ouvrage est consacré à démontrer les dégâts causés par l'homme à l'environnement, entraînant une diminution de la productivité de l'environnement et des impacts sur la santé de l'homme. Il considère que *l'affluente society* (société d'abondance) s'est transformée en *effluente society* (société dépotoir). C'est donc davantage l'aval des ressources naturelles qui inquiète Ehrlich que le côté amont et l'épuisement des ressources naturelles, bien qu'il note que les prix des ressources vont à coup sûr monter puisque celles-ci sont en quantités limitées. Pour lui, ce combat contre la croissance de la population est un combat difficile car elle prend racine dans la nature même de l'homme, dans sa survie, dans l'économie et la religion. Néanmoins, Ehrlich ne nie pas l'influence d'autres variables comme

la production matérielle par tête et l'effet du progrès technique même si il les juge considérablement moins importantes que la population. L'un des principaux apports d'Ehrlich est d'avoir d'ailleurs désagrégé l'impact de l'homme sur l'environnement en trois effets individuels : la population, le PIB/tête et le progrès technique (Ehrlich et Holdren, 1971). Cette désagrégation a depuis connu un succès important sous le nom de l'équation IPAT²⁶.

Néanmoins certains détracteurs de la thèse d'Ehrlich lui reprocheraient de ne pas considérer le progrès technique pour limiter l'impact de la croissance démographique alors qu'il s'accorde à penser comme l'économiste J. J. Spengler que la croissance future dépend du progrès technique et qu'il est envisageable que celle-ci maintienne le niveau de vie d'une population stable.

On peut donc constater trois limites au travail d'Ehrlich. La première limite et peut être la plus importante, c'est d'avoir considéré - tout comme l'a fait Malthus - que la conjoncture démographique pourrait être représentative du trend de long terme et qu'on peut donc faire des extrapolations à partir d'une période particulière. La seconde c'est aussi d'avoir sous-estimé le progrès technique notamment agricole. Enfin c'est sa vision étroite de l'épuisement limitée à une partie du facteur demande : la population. Certes, la population et sa croissance représentent une partie importante de l'équation de l'épuisement des ressources mais pas la totalité. Cette focalisation s'explique aussi par son cantonnement à la sphère agricole des ressources naturelles. Ces trois limites conjuguées entre elles, ont poussé Ehrlich à réviser régulièrement ces prévisions qui s'avéraient sans cesse erronées (Ehrlich et Ehrlich, 2009). D'un autre côté, ces erreurs de prévision se sont aussi concrétisées car les politiques publiques des nations ont suivi la voie de la diminution du taux de natalité, ce qu'encourageait fortement l'auteur. Au final, le cœur de la thèse d'Ehrlich reste fondamentalement la même, la population doit être réduite car son niveau excède la capacité de production maximale des ressources naturelles pouvant être fournies par la terre.

4.3 *Goergescu Roegen : une approche physique et critique de la perception économique de l'épuisement*

Goergescu-Roegen traduit au travers de différents articles et ouvrages (Goergescu-Roegen, 1971 ; 1975 ; 1979 ; 2006) l'incarnation de la bioéconomie parfois aussi nommée économie écologique. Ce courant entreprend une analyse économique dans une perspective interdisciplinaire en empruntant un certain nombre de notions à la physique

²⁶ Impact, Population, Affluence, Technology.

thermodynamique. Cette approche est ancienne comme le relate Cleveland (1987) et sa naissance remonte probablement aux physiocrates et aux scientifiques du XIX^{ème} siècle (Sadi Carnot).

La biophysique relève d'une approche du processus de production fondamentalement différente de celle avancée par la théorie économique dominante. Tout d'abord, l'économie est perçue comme un sous-système de l'environnement (Goergescu-Roegen, 2006 ; Daly, 1985). Les économistes auraient en effet succombé à l'illusion de la monnaie qui rendrait possible la pensée d'un système économique indépendant, autosuffisant, pouvant croître sans limites et où les ressources naturelles ne joueraient aucun rôle (Figure 2-8). Toutefois, d'après l'approche biophysique, cette vision monétaire des flux physiques violent la plupart des lois de la thermodynamique (équilibre des masses et deuxième principe de la thermodynamique²⁷). Cleveland estime d'ailleurs que la dette est une construction monétaire mathématique qui, via les intérêts composés, peut croître sans relation avec le réel, du moins à court terme. Lorsque la sphère monétaire s'éloigne trop de la réalité des richesses économiques (qui elle, est de nature physique), il s'en suit un réajustement monétaire (destruction de valeur) qui provoque des crises importantes. L'erreur de l'économie serait d'avoir placé le capital et le travail au centre des réflexions en considérant que les flux d'énergie et de matières étaient non contraignants alors que notre économie de vaisseau spatial impliquait de faire exactement l'inverse (voir Boulding, 1966 ; 1992).

La position de Schumacher (1973) peut également être rattachée au courant biophysique pour au moins deux raisons²⁸. D'une part, du fait de ces critiques de l'économie qu'il perçoit comme une science conduisant à un inventaire de biens indifférenciés et interchangeables grâce à une évaluation dominée par la valeur monétaire. Cette science reconnaît donc une substituabilité parfaite entre tous les biens, qu'ils soient produits par l'homme ou issus directement de la nature. Cela traduit pour cet auteur un refus de reconnaître la dépendance de l'homme vis-à-vis de la nature. Il regrette que l'économie échoue à rendre compte des différences qualitatives entre les biens et reste globalement concentrée sur des questions quantitatives. D'autre part, il opère une distinction entre des biens primaires mis à disposition par la nature et des biens secondaires produits par l'homme. Il ajoute que l'homme ne peut

²⁷ Ce principe sous-tend l'irréversibilité des phénomènes physiques notamment lorsqu'il y a échange de chaleur. Globalement, ce principe montre que chaque transformation d'énergie crée de l'entropie et qu'un système fermé ne peut que tendre vers un état d'équilibre où il existe un niveau d'entropie maximal.

²⁸ Voir le chapitre *The Role of Economics* inclus dans l'ouvrage *Small is Beautiful: A Study of Economics as if People Mattered*.

pas créer des biens primaires, il ne fait que les convertir en biens secondaires au moyen de l'énergie. Plus tard, Greer (2013) un de ces disciples ira plus loin en distinguant trois économies : une économie primaire assurée par la nature, une économie secondaire entretenue par l'homme (l'économie réelle) et une économie tertiaire (la sphère monétaire). Il montre que l'économie tertiaire est dépendante de l'économie secondaire, elle-même nécessitant des flux de l'économie primaire pour rester en équilibre. Chacune de ces économies produirait des richesses différentes qui ne seraient pas interchangeables et resteraient guidées par des mécanismes spécifiques²⁹.

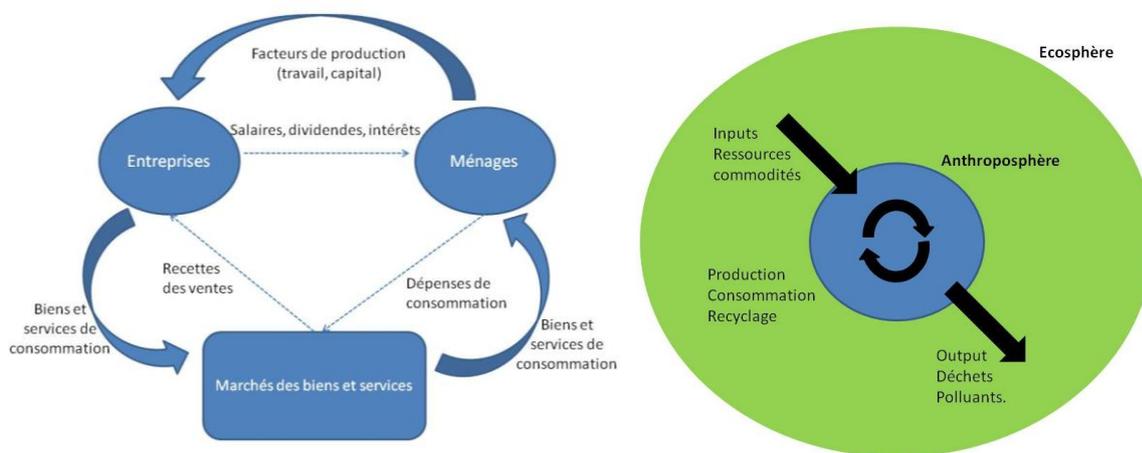


Figure 2-8 Différence entre la vision traditionnelle de l'économie et l'intégration de l'environnement, Source : Adapté d'Arnim Von Gleich (2006), auteur

La pensée de Goergescu Roegen est plus complexe car elle nécessite des notions de thermodynamique. Ces lois de la thermodynamique s'appliquent pourtant à la totalité du processus économique et de façon générale à n'importe quelle forme de vie (Goergescu-Roegen, 2006). Goergescu-Roegen note quelque chose de surprenant, à savoir que la théorie newtonienne de la mécanique a depuis longtemps été abandonnée en physique au profit de la révolution carnotienne, alors que l'économie fonderait toujours son analyse sur cette représentation du monde. Cette représentation du monde repose sur une vision d'un mouvement de va et vient entre consommation et production à l'intérieur d'un système clos traduisant un système autosuffisant et pouvant se perpétuer d'une façon pérenne. Les marxistes se seraient appuyés sur le même type d'hypothèse en estimant que la nature offre des dons gratuits. Les économistes de manière générale n'appréhenderaient pas l'économie comme un processus technique visant à absorber un flux énergie matière en provenance de

²⁹ Des mécanismes de rétroactions négatives pour les deux premières économies et de rétroactions positives pour la dernière.

l'environnement pour le rejeter sous une autre forme toujours dans l'environnement. L'homme ne crée ni matière ni énergie (première loi de la thermodynamique). Le processus économique n'engendre qu'une transformation qualitative du flux énergie matière et aucunement une transformation quantitative. Cette transformation qualitative s'appelle entropie. L'homme au travers du processus économique ne ferait qu'accroître l'entropie du flux énergie-matière. L'entropie peut être définie comme une mesure de l'énergie inutilisable ou liée dans un système thermodynamique. L'homme a besoin d'énergie libre pour effectuer des actions et ne peut pas se servir d'énergie liée. Lorsqu'il effectue des transformations ou qu'il utilise cette énergie, celle-ci se dégrade sous forme de chaleur dissipée et devient de l'énergie liée. On ne peut rien faire d'une énergie liée car elle est dissipée de façon chaotique, ce qui nous conduit à une deuxième définition de l'entropie qui consiste à la visualiser comme une mesure de l'ordre et du désordre.

La deuxième loi de la thermodynamique implique que l'énergie thermique libre d'un système se dégrade continuellement en énergie liée. L'entropie d'un système isolé augmente et ne peut jamais diminuer sans l'introduction d'un flux de plus basse entropie venant de l'extérieur, le système est alors ouvert. Mais l'entropie ne diminue pas au niveau du système global mais est simplement déplacée de l'intérieur vers l'extérieur du sous-système. La vie n'échappe pas à cette règle et constitue une lutte permanente contre la dégradation entropique de sa structure matérielle que les organismes pallient par l'absorption de basse entropie. On comprend que le phénomène de l'entropie qui caractérise la vie et toutes activités économiques implique la notion d'irréversibilité. La vision uniquement monétaire de l'économie constituerait en soi une vision trompeuse car la monnaie circule dans les deux sens sous entendant que tous les processus sont réversibles alors que même la monnaie finira par s'user elle-même. Le recyclage n'échapperait pas à la règle et nécessiterait l'introduction de basse entropie pour restaurer le niveau d'entropie initial. Il existe deux sources de basse entropie, un stock présent sur terre et un flux constant provenant du soleil. L'homme, passé à la révolution industrielle, a basculé d'une ponction de basse entropie basé sur un flux à une ponction majoritairement basé sur un stock. La survie de l'humanité dépendant de cette ponction de basse entropie conduit Goergescu Roegen à estimer que l'homme devra domestiquer au mieux ce flux de basse entropique venant du soleil.

Le mouvement biophysique envisageant l'économie sous l'angle de la thermodynamique entre donc en contradiction au mouvement mécanique du courant économique dominant par la prise en compte de l'entropie et de l'irréversibilité du processus économique et par la place

centrale jouée par l'énergie et la matière comme support ultime et non substituable. Autrement dit, ce courant supporte la soutenabilité forte, ce qui implique une substituabilité faible entre les ressources naturelles et le capital (Ayres, 2001 ; 2007)³⁰. Ces auteurs supposent que les possibilités de substitution entre les ressources naturelles et le capital sont très restreintes (Daly, 1997a). Certaines études économiques démontrent des possibilités de substitution entre ressources naturelles et capital mais elles sont souvent réalisées à une échelle trop petite ou ignorent certaines ressources naturelles (Cleveland et Ruth, 1997). Pourtant, certains détracteurs de l'approche biophysique perçoivent certaines solutions technologiques comme des possibilités de substitution entre les ressources naturelles et le capital, comme en passant d'une scierie de bucheron à une scierie mécanisée qui consommerait moins de bois en réalisant autant de planche. Seulement, cet exemple est serait incorrecte d'après les tenants de l'approche biophysique dans la mesure où il comporte un changement de la fonction de production donc d'isoquante. On ne pourrait donc pas parler à proprement parler de substitution entre les facteurs de production. La plupart des auteurs du courant biophysique proposent d'éviter certaines hypothèses comme la substitution totale de matière et d'énergie tout en faisant croître le capital à l'infini comme supposé sous certaines conditions dans l'article de Solow (1974). Cela signifie en d'autres termes que les ressources naturelles seraient dans la plupart des cas complémentaires au capital et au travail. Une fois intégré ces limites, un modèle de croissance calqué sur la logique de celui de Solow réussit à montrer que l'énergie est indispensable à la croissance du Produit Intérieur Brut (Stern et Kander, 2012). Pour terminer, plusieurs économistes ont démontré au travers de nombreux articles que de nombreuses ressources naturelles et de nombreux services fournis par les ressources naturelles ne sont pas substituables ni par le capital ni par la technologie (Ayres, 2007 ; Krutilla, 1967 ; Smith et Krutilla, 1979a ; Smith, 1990).

Sur la puissance de la technologie pour repousser la rareté des ressources naturelles, l'approche biophysique ne nourrit pas non plus le même optimisme que le courant néoclassique. On peut classer cette approche critique du pouvoir de la technologie sous quatre arguments principaux :

³⁰ Ce conflit entre ces deux courants a d'ailleurs pris un nom : celui de soutenabilité forte contre soutenabilité faible (« strong sustainability vs weak sustainability »), un désaccord concentré principalement sur les possibilités de substitution des ressources naturelles par d'autres facteurs. En somme, un débat ayant déjà fait coulé beaucoup d'encre (Neumayer, 2000, 2003 ; Ayres, 2007) et provoqué la création de forum au sein d'Ecological Economics (Daly, 1997a, 1997b ; Common, 1997 ; Turner, 1997 ; Stiglitz, 1997 ; Solow, 1997 ; Muiyami et al., 1998).

- La technologie a des limites physiques et on commence à percevoir ces limites dans certains secteurs économiques (Cleveland et Ruth, 1997 ; UNEP, 2013). Dans le domaine des transports par exemple, les gains en termes d'efficacité et de progrès technique ne pourront jamais conduire à dépasser un rendement énergétique supérieur à un (l'énergie en input dans le réservoir ne peut être inférieure à l'énergie transmise aux roues en output) voire un rendement inférieur à 1³¹, ni descendre en dessous du minimum énergétique théorique requis pour déplacer une masse d'un point A vers un point B. D'une manière similaire, il existe des limites théoriques à la baisse de la consommation énergétique dans le secteur minier et cela tout au long des procédés de la chaîne de valeur (voir Rankin, 2011).
- La technologie consomme elle-aussi des ressources naturelles. Elle ne peut donc constituer qu'une solution temporaire et limitée au problème de l'épuisement.
- Enfin et dans la filiation de Jevons, la technologie entraîne souvent un effet rebond de la part de la demande en ressources naturelles qui conduit parfois à annihiler le gain en terme de sauvegarde de ressources.
- La technologie est souvent orientée vers des fins défavorables à l'environnement comme la publicité, l'obsolescence planifiée, la mode, et une qualité faible des biens de consommation (Boulding, 1966) alors qu'elle devrait en toute logique renforcer la durabilité et la réparabilité des biens de consommation (McDonough et Braungart, 2011) via l'éco-conception.

La technologie quelque soit ces progrès ne pourrait donc pas s'affranchir des ressources naturelles, et devrait être utilisée dans l'optique de produire autant avec moins et non pas de produire plus avec autant dans l'objectif de soutenir une croissance matérielle toujours plus importante (Daly, 1995a).

L'approche biophysique nourrit aussi des oppositions externes avec le courant néo-hotellinnien sur la question de l'équité intergénérationnelle. L'équité intergénérationnelle est prise en compte dans l'approche néo-hotellinnienne via l'actualisation des utilités dans le temps. Force est de constater que cette approche de l'actualisation reflète le comportement des agents économiques (entreprises et particuliers) qui actualise leurs profits étalés dans le futur. Seulement, l'utilisation du taux d'actualisation revient à attribuer un poids quasiment

³¹ Le rendement d'un moteur dépend comme n'importe quelle machine thermique fournissant un travail, de la température de fonctionnement du moteur et de la température extérieure au moteur (source froide). Le rendement de ce type de moteur est égal à $1 - (\text{température de la source froide} / \text{température de la source chaude})$ auquel il faudrait retrancher les pertes énergétiques dues aux frottements.

nul à l'utilité des générations éloignées dans le futur. D'un point de vue éthique, bien que le processus d'actualisation reflète le comportement de l'homme, il est dérangeant d'affirmer qu'il est optimal pour un Etat (ou la société dans son ensemble) puisque la maximisation de l'utilité de l'individu revient à encourager à repousser les coûts dans le futur (afin de les réduire mécaniquement par l'actualisation) et toucher les profits le plus possible dans le présent (afin d'assurer un rendement financier maximum). Ce comportement est finalement très proche de celui d'un enfant repoussant les devoirs au lendemain et profitant des récompenses dans la journée, un type de comportement pourtant peu encouragé du point de vue sociétal.

Pour être sûr que les prix soit justes, il faudrait d'abord connaître la vraie valeur de la ressource in situ (Goergescu-Roegen, 1979). Or la seule façon, rarement envisagée dans la littérature économique, d'évaluer un bien non reproductible passe par sa mise aux enchères. Seulement une condition nécessaire de son efficacité demande que tous les agents ayant des intérêts pour l'offre puissent y participer. Or, les générations futures ne peuvent y participer. On peut donc légitimement penser que les prix des ressources naturelles sont sous évalués, et ces dernières consommées en trop grandes quantités par les générations actuelles. C'est donc davantage un problème d'éthique qu'un problème économique. L'actualisation de l'utilité ne remplirait son rôle que pour des individus mortels mais pas pour une nation ou une espèce qui aura toujours les mêmes besoins demain. Le paradoxe, c'est qu'avec une infinité de génération, la distribution équitable revient à ne consommer aucune unité de ressource. Pour Goergescu-Roegen, il vaudrait donc mieux minimiser les regrets futurs que maximiser l'utilité car l'actualisation revient à une dictature du présent sur le futur. Costanza et Daly (1992) considèrent de leur côté que le comportement d'actualisation pourrait être symptomatique d'un comportement semi-rationnel, sous optimisateur connu comme un piège social (« social trap »). Il existe une situation dite de *social trap* lorsqu'un individu agit pour obtenir des gains à court terme sans que cela soit compatible avec les intérêts de l'individu ou de la société sur le long terme. Par ailleurs, le recours à la technique d'actualisation économique pose également le problème de la valeur du taux d'actualisation. Cette valeur de préférence pour le présent dépend des individus et de l'incertitude inhérente à l'action. Quel taux choisir alors à l'échelle de la société ? La technologie joue aussi un rôle important dans la définition du taux correct d'actualisation. Si en effet, la technologie pourra nous permettre dans le futur d'améliorer le confort et le niveau de vie des hommes avec moins de ressources naturelles, l'équité intergénérationnelle voudrait que la génération présente qui ne bénéficie pas de cette

technologie future consomme en contrepartie davantage de ressources naturelles épuisables (Stiglitz, 1979 ; Barnett et Morse, 1963). L'usage d'un taux d'actualisation positif pour définir la consommation des générations présentes est alors possible. Au contraire, si comme le craignent beaucoup de climatologues, la croissance de la productivité dans le futur pourrait devenir négative, l'équité intergénérationnelle impliquerait d'utiliser un taux d'actualisation négatif (Costanza et Daly, 1992). Cette incertitude sur la productivité des ressources naturelles épuisables dans le futur a conduit Daly (1990) à proposer une règle opérationnelle d'utilisation d'une ressource naturelle épuisable consistant à la consommer à un rythme ne devant pas dépasser sa substitution par une ressource renouvelable.

Toutefois, loin de former un mouvement uni, les partisans de l'approche biophysique entretiennent également des oppositions internes. Goergescu-Roegen a conservé jusqu'à sa mort une position différente de ses successeurs notamment sur le facteur ultime faisant obstacle à la croissance. Alors que nombreux de ses successeurs (Cleveland et Ayres) voient via l'entropie, l'énergie comme la ressource ultime, Goergescu-Roegen estime que les ressources matérielles autrement dit la matière représentera le principale obstacle au maintien de l'humanité dans le futur. Cette vision singulière de l'auteur s'explique par sa théorie sur une quatrième loi de la thermodynamique affectant la matière (voir Goergescu-Roegen, 2006, chapitre 4). La transformation d'une énergie chimique en énergie mécanique créerait des frictions ce qui entraînerait une déperdition d'énergie libre en énergie liée sous forme de chaleur. Il est paradoxal d'après l'auteur qu'on ne se soit pas intéressé à l'impact de ces frictions sur la matière. L'entropie de la matière ne peut qu'augmenter d'après Goergescu-Roegen car toute transformation énergétique demande un support matériel et provoquerait donc une dissipation de la matière. Il s'oppose au dogme énergétique qui perçoit l'énergie comme la limite ultime et qui affirme que nous pouvons nous procurer n'importe quelle matière en n'importe quelle quantité avec une quantité suffisante d'énergie. Or même avec une quantité illimitée d'énergie, il faudrait un temps quasi infini pour récupérer la matière s'étant dissipée dans l'espace. Par conséquent, la création d'entropie provoquée par l'homme au niveau de la matière ne peut être totalement résolue avec plus d'énergie. Avec la quatrième loi de la thermodynamique appliquée à la matière de Goergescu-Roegen rejette l'affirmation qui consiste à penser qu'on ne manquera jamais de matières premières sous prétexte que la terre en est constituée est absurde. Car si le stock de matière est constant, le stock de matière utilisable décroît (l'entropie de la matière augmente). Comme la terre est un système ouvert du point de vue de l'énergie mais un système fermé du point de vue de la matière, l'existence

d'un phénomène d'entropie pour les deux variables rendrait nécessairement le maintien du niveau de la seconde plus problématique. Si le phénomène d'accroissement naturel de l'entropie de la matière a été infirmé physiquement (Cleveland et Ruth, 1997), il est incontestable qu'il existe un phénomène d'accroissement humain de l'entropie de la matière qui rend chaque année une grande quantité de matière inutilisable. L'énergie peut certes aider à récupérer cette matière dissipée mais deux problématiques demeurent. Tout d'abord à quel coût pouvons-nous récupérer cette matière dissipée ? Si le coût énergétique de cette récupération est prohibitif, et que nous ne disposons pas de suffisamment d'énergie, l'homme finira par manquer de matière utilisable. Ensuite se pose la question de la vitesse de récupération de cette matière dissipée. Si nous récupérons moins vite la matière dissipée que nous entamons le stock de matière utilisable, nous finirons indubitablement par ne plus pouvoir satisfaire nos besoins en matière. La réponse à ces deux questions suffit à déterminer si un état stationnaire est possible ou pas. Pour Goegescu-Roegen (1979 ; 2006) et à la différence de Daly, l'état stationnaire n'est pas plus soutenable que la croissance perpétuelle du fait de cette quatrième loi de la thermodynamique affectant la matière. C'est pourquoi il milite pour la décroissance.

4.4 *Le rapport Meadows : Une approche via les systèmes*

En 1968, Aurélio Peccei créa le club de Rome, un comité de réflexion informel regroupant un ensemble de personnalités du monde scientifique et industriel et ayant vocation à répondre à des problématiques complexes pouvant impacter à la fois les pays développés et les pays en développement. En 1972, le club de Rome publia son premier rapport *The Limits to Growth* (1972) souvent dénommé le rapport Meadows, le nom du chef de la commission Dennis Meadows.

Le rapport Meadows en 1972 a pour principal objectif de souligner la trajectoire insoutenable dans laquelle s'engage le monde économique. Ce rapport rencontra un retentissement important au niveau du grand public notamment après le premier choc pétrolier, peut être interprété alors comme un signe précurseur de l'effondrement prédit dans plusieurs des scénarios de *The Limits to Growth*. Au contraire, le monde académique économique rejeta avec véhémence les conclusions de ce rapport (Solow, 1974 ; Nordhaus, 1973 ; Simon, 1981). Ils reprochaient principalement au modèle de ne pas prendre en compte explicitement la variable prix et son influence sur les autres variables ainsi qu'une vision statique du stock de ressources non renouvelable. Après le contre-choc pétrolier de 1986, les faits empiriques semblent invalider les principaux résultats du modèle faisant retomber l'engouement pour

celui-ci. Durant les années 80 et 90, un ensemble d'ouvrages et d'articles contestent l'intérêt et la pertinence du rapport en prétextant de manière erronée que l'effondrement prévu pour la fin des années 1990-2000 n'eut pas lieu. Des mises à jour du rapport avec des données plus récentes furent publiées à différentes échéances : en 1992 avec *Beyond The Limits* et en 2004 avec *The Limits to Growth : The 30 years Update*. Ces mises à jour n'entraînent que des modifications mineures dans les conclusions originelles des auteurs : le monde s'est engagé sur une voie insoutenable et dépasse désormais les limites de la planète en termes de débit (ressources naturelles en inputs) mais surtout en termes d'exutoires (capacité d'absorption des écosystèmes). Les limites ne doivent pas être perçues comme des murs infranchissables (c'est pourquoi nous sommes au-delà) et il est possible de les dépasser mais de manière ponctuelle en entamant les stocks de ressources naturelles.

Le modèle World3 du rapport Meadows ne doit pas être perçu comme un modèle de prévision, les auteurs ont souhaité davantage se livrer à un exercice de prospective évaluant les différents possibles et leurs conséquences. Contrairement à ce qui est couramment perçu, le rapport Meadows a établi 11 scénarios différents allant du plus optimiste au plus pessimiste. Les auteurs du rapport Meadows ne sont pas des anti-marché ou des anti-technologies, ils admettent simplement que le marché mettrait du temps à réagir et qu'il suivrait les intérêts des classes au pouvoir tandis que la technologie impliquerait une inertie dans sa mise en place et un coût non nul qui va croissant au fur et à mesure qu'on se rapproche des limites du système.

Le modèle du rapport Meadows est original à plusieurs égards :

- Tout d'abord c'est la première modélisation d'un système économique global intégré à l'environnement.
- Le modèle repose sur la mise en lumière de boucles de rétroaction positives et négatives affectant la population et la production de capital. Les rétroactions peuvent s'équilibrer ou en l'absence d'un poids suffisant d'une rétroaction négative conduire à une croissance exponentielle de la variable. En effet, la croissance de ces variables est dynamique et dépend également du stock précédent auquel se rajoute le nouveau flux. Ces boucles de rétroaction sont guidées par des paramètres (taux de naissance et de décès, taux d'investissement et de dépréciation du capital) eux-mêmes déterminés de façon endogène.

- Il introduit la possibilité d'un phénomène d'érosion des limites avec ou sans possibilité de régénération de ces limites. Si on exploite une forêt trop rapidement, on entame le stock ce qui conduit à un flux plus faible de nouveaux arbres chaque année, ce qui abaisse la limite. Cette limite peut se régénérer compte tenu un certain délai, mais d'autres activités irréversibles de l'homme, en particulier sur les écosystèmes, peuvent éroder définitivement certaines limites.
- Il applique des délais dans l'impact d'une variable sur une autre. Il faut du temps à la pollution pour affecter la santé des hommes, réduire la qualité des sols, ou dégrader la biodiversité comme l'illustre le réchauffement climatique. De la même manière, une hausse du prix signalant la rareté déclenche des investissements en R&D qui si ils débouchent, aboutissent au progrès technique mais avec un certain délai. La mise en place de la nouvelle technologie nécessite ensuite plusieurs années avant d'impacter la totalité du capital du système. La présence d'inertie renforce la pertinence de l'anticipation pour prévoir les conséquences d'une action ainsi que le ralentissement de la vitesse du système pour allonger le temps de « réaction efficace ».
- Enfin, l'originalité du modèle s'explique aussi principalement par sa vision systémique du monde économique. Réduire les pénuries dans un secteur est souvent possible via des solutions technologiques mais cela conduit souvent à déplacer le problème vers un autre secteur.

Cette dernière vision résume bien les principaux résultats de modèle World3, à savoir une croissance infinie est seulement possible dans un monde où la croissance des inputs et des outputs est infinie, ce qui ne correspond pas à la réalité où des limites physiques existent. Ce scénario 0 dénommé « utopie technologique » existe dans *The Limits to Growth* même s'il n'est pas envisagé sérieusement par les auteurs. Au contraire, huit autres scénarios tablant sur la perpétuation de la croissance (essentiellement matérielle) avec ou sans progrès technologique finissent par buter sur des contraintes physiques (épuisement des ressources non renouvelables, pollution, chute des rendements agricoles, crise des coûts technologiques...). Ces contraintes conduisent à un effondrement du système dans le courant du XXIème siècle. La seule voie soutenable est illustrée dans les scénarios 9 et 10 qui consistent en une stabilisation de la population et du capital par tête tout en investissant suffisamment le surplus en capital dégagé dans les technologies pour réduire l'empreinte écologique de l'homme. La date de la stabilisation de ces variables va définir le niveau de vie

soutenable à long terme. Autrement dit plus la stabilisation interviendra tard et plus le niveau soutenable possible sera faible (nourriture par habitant, capital par tête...).

De nombreux auteurs ont revisité les conclusions du club de Rome (Trainer, 1999 ; Simmons, 2000) et s'accordent à dire que plusieurs limites investies dans le rapport Meadows semblent se matérialiser. Ainsi Goeller et Weinberg (1978), Goeller (1979), Simmons (2000), Jancovici (2011), Jancovici et Grandjean (2007, 2010) voient très clairement le secteur de l'énergie comme une limite à la croissance du système, même si Trainer (1999) considère que les limites sont plus générales et que l'homme dépasse globalement les capacités de charge de la planète terre. D'autres hypothèses fortement contestées par les économistes (Simon, 1981) comme la croissance des coûts lorsqu'on approche les limites d'exploitation des ressources non renouvelables du système sont postulés comme réalistes comme le suggèrent Trainer (1982), Prior et al. (2011). Maintenir les coûts d'extraction des ressources non renouvelables deviendrait de plus en plus difficile même avec le progrès technique. Comme la relation entre les intrants (eau et énergie) et le niveau de concentration des minerais suit une relation inverse, la croissance continue du niveau de production de minerais nécessiterait d'abaisser toujours plus le coût de l'eau et de l'énergie. Or comme pour les coûts de dépollution, on peut estimer qu'il est de plus en plus coûteux de diviser le coût de ces intrants et donc que l'amélioration de la technologie nécessiterait toujours plus de capitaux.

Un autre auteur (Turner, 2008) a montré également que les conclusions du rapport Meadows restent très actuelles et que la trajectoire de l'économie mondiale entre 1970 et 2000 semble correspondre à la trajectoire du scénario référentielle du modèle World3 (Figure 2-9). Au contraire, les scénarios de stabilisation ou d'atténuation des limites par la technologie correspondent moins au chemin engagé par l'économie mondiale conduisant Turner à la conclusion que l'économie suivrait un chemin non soutenable et qu'il faudrait entreprendre différentes mesures pour changer de trajectoire et éviter l'effondrement.

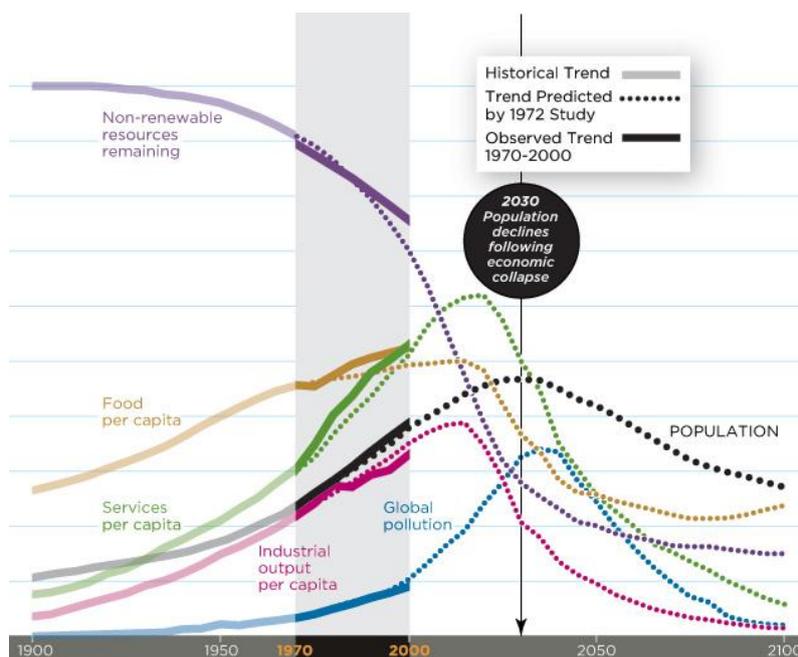


Figure 2-9 Comparaison des résultats du model avec l'évolution des variables réelles entre 1970 et 2000, source : Turner (2008)

Néanmoins, comme l'assument les auteurs du rapport Meadows, le modèle World3 représente une construction mentale simplifiée du monde réel, il n'est donc pas la réalité. Notamment, il ne prend pas en compte l'hétérogénéité spatiale entre pays en développement et pays industrialisés. Autre point problématique, World3 est un modèle général où les ressources sont agglomérées, il ne détermine donc pas l'épuisement de chaque type de ressources non renouvelables. Il se pose donc la question du type de substitution entre les ressources non renouvelables mais aussi du type de substitution entre les ressources épuisables et renouvelables. Si les possibilités de substitution entre les ressources non renouvelables sont faibles voire nulles, la croissance du système est limitée non pas par la statistique agglomérée des ressources mais par le stock le plus faible d'une des ressources essentielles. Si au contraire les possibilités de substitution sont fortes alors l'utilisation de la statistique agglomérée à plus de pertinence. Enfin si les ressources non renouvelables sont substituables par des ressources renouvelables, la contrainte terminale est davantage représentée par le stock des ressources renouvelables que par le stock des ressources non renouvelables.

Loin de faire l'unanimité, le modèle du club de Rome fut largement mis de côté dans le monde économique au profit du renouveau de la thèse d'Hotelling qui donne lieu à partir de 1973, à une littérature académique considérable s'attachant à établir les conclusions résultantes de l'introduction d'hypothèses plus réalistes.

5 Le regain de considération pour la sphère des ressources naturelles

5.1 La littérature Néo-Hotellinienne

Le renouveau de la thèse d'Hotelling a été engagé principalement suite à la modification du contexte conjoncturel des prix de l'énergie à partir du début des années 1970. Entre la publication de l'article séminal d'Hotelling et les années 70 seuls quelques auteurs ont manifesté de l'intérêt pour cette thèse et de manière assez tardive (Gordon, 1967). En 1970, les prix de l'énergie amorcent une légère hausse et le premier choc pétrolier survient en 1973. Deux articles principaux vont relancer l'engouement pour la thèse d'Hotelling, celui de Nordhaus (1973) et de Solow (1974). Ces auteurs souhaitent, par la réappropriation de la thèse d'Hotelling, apporter une réponse économique au phénomène d'accroissement du prix des ressources non renouvelables énergétiques. Les différentes contributions qui suivirent s'attachèrent donc à vérifier les conséquences sur le chemin de prix et de la production suite au relâchement de certaines hypothèses de modèle d'Hotelling ou grâce à l'intégration d'autres hypothèses plus réalistes.

Dans la plupart des situations, l'introduction d'une nouvelle hypothèse ou au contraire le relâchement d'une hypothèse soutenue dans le modèle d'Hotelling conduit à un chemin de prix ne suivant plus la règle d'Hotelling. On peut donc s'attendre à ce que les prix des ressources épuisables dans le monde réel suivent des trajectoires plus complexes que la règle d'Hotelling. Nous explorons les résultats proposés par la littérature néo-hotellinienne suite à une modification de la structure du marché (a), l'introduction d'un coût dépendant de la production cumulée (b), d'une backstop technology (c), de l'activité d'exploration (d), d'une qualité de gisement non uniforme (e), d'une incertitude portée sur l'offre ou la demande (f), de la possibilité d'un stock maintenu par le recyclage (g), et d'un effet du progrès technique (h).

Changement de la structure de marché (a)

La règle d'Hotelling fut obtenue sous une hypothèse assez stricte respectant la présence d'un marché concurrentielle. Néanmoins, la réalité des marchés des ressources naturelles est assez éloignée de cette situation d'atomicité des marchés. Les activités d'extraction des ressources nécessitent des capitaux importants, c'est pourquoi ces marchés sont souvent concentrés et limités à quelques acteurs. La littérature théorique a investi cette problématique en supposant des modifications de la structure de marché diverses : monopole, monopole avec frange compétitive, oligopole de type Cournot ou Stackelberg pour refléter la possibilité d'un cartel.

En situation de monopole, c'est la recette marginale moins le coût marginal et non plus le prix net du coût d'extraction qui doit croître au taux d'intérêt (Solow, 1974). L'impact du monopole sur la règle d'Hotelling dépendra essentiellement de la forme de la demande puisqu'elle définit la recette marginale (Weinstein et Zeckhauser, 1975). On en déduit que le comportement du monopole différera du modèle compétitif si l'élasticité prix de la demande n'est pas constante (Stiglitz, 1976 ; Devarajan et Fisher, 1981 ; Rotillon, 2005). Ainsi si l'élasticité diminue lorsque les quantités augmentent, le monopole épuisera la ressource plus lentement (Dasgupta et Heal, 1979) et le prix augmentera moins vite que le taux d'intérêt. De la même manière si la demande devient plus élastique au fur et à mesure du temps du fait de la création de substitut par exemple, le monopole sur-conservera la ressource naturelle par rapport à la situation concurrentielle (Weinstein et Zeckhauser, 1975; Stiglitz, 1976). Le cas inverse conduit à ce que le monopole produise la ressource plus rapidement et que le prix progresse plus vite que le taux d'intérêt mais paraît irréaliste d'un point de vue empirique car il crée des possibilités d'arbitrage et renforce les possibilités de substitution ce qui ne garanti pas que ce résultat soit stable (Deverajan et Fisher, 1981).

La situation d'un monopole à frange compétitive ou d'un marché composé d'un cartel et de plusieurs petits producteurs participant à un jeu non coopératif de type Cournot fut aussi analysée dans l'article de Salant (1976). Le modèle de Salant suppose un cartel détenant plusieurs gisements et d'autres producteurs détenant chacun un gisement. Le coût est supposé constant, ce qui implique que le cartel n'a pas d'avantages compétitifs sur ces concurrents, il possède seulement plus de réserves. Salant démontre que cette situation débouche sur la constitution de deux périodes. Une première période où toutes les entreprises produisent et où le prix progresse au taux d'intérêt jusqu'à épuisement des réserves des petits producteurs, puis une seconde période où le cartel produit seul et où le prix s'accroît moins vite que le taux d'intérêt. Par ailleurs, Gilbert (1978) montre aussi que la constitution du cartel accroît proportionnellement plus les profits de la frange que ceux du cartel. Ulph et Folie (1980) postulent au contraire des coûts toujours constants mais différents entre la frange et le cartel. Ils montrent que la constitution d'un cartel peut faire chuter la rente des entreprises de la frange si le cartel bénéficie d'un avantage compétitif en termes de coûts. Plus l'avantage en termes de coûts sera important pour le cartel, plus il aura tendance à produire seul en début de période tandis que la frange produira seule en fin de période. D'une autre façon, Gilbert (1978) cherche à déterminer le résultat d'une situation similaire dans le cadre d'un équilibre de Stackelberg, c'est-à-dire dans un contexte où il existe une firme dominante adaptant ses

prix en fonction de ses concurrents tandis que ces derniers considèrent le prix comme une donnée. Gilbert considère deux situations, une où les capacités de production de la frange sont libres et une autre où ces capacités sont limitées, avec des coûts constants dans les deux situations. La première situation conduit la firme dominante à adopter une stratégie optimale indépendante de ses coûts et de ses réserves et dépendant entièrement des caractéristiques de la frange. Le prix progresse alors de façon monotone jusqu'à l'épuisement des réserves de la frange compétitive. La seconde situation pousse la firme dominante à se comporter comme une firme classique et le prix demeurera constant voire diminuera si les capacités de production de la frange augmente. Arrivé à un certain stade, la contrainte de production de la frange n'est plus liante et cesse de jouer, le prix cesse alors d'être constant ou de décroître et se remet à croître à un rythme monotone jusqu'à l'épuisement des ressources de la frange.

Coût dépendant de la production cumulée (b)

Si on suppose tout d'abord un coût constant non nul, on comprend intuitivement que le prix de la ressource ne peut plus suivre la règle d'Hotelling. Le prix augmentera tout d'abord moins vite que le taux d'intérêt car la rente de rareté ne constitue qu'une partie du prix de la ressource. La vitesse de croissance du prix de la ressource augmente au fur et à mesure que la part de la rente de rareté dans le prix augmente. Parvenu à un certain stade, la vitesse d'accroissement du prix de la ressource tend vers le taux d'actualisation lors d'un passage à la limite (Weinstein et Zeckhauser, 1975).

Les économistes ont aussi souhaité intégrer très rapidement la possibilité d'un effet de stock pour le coût. En effet, au fur et à mesure que la production cumulée augmente, les gisements en surface s'épuisent et l'homme doit alors extraire des ressources en plus grandes profondeurs ou des gisements de moins bonne qualité. Cet effet conduit à faire croître le coût en fonction de la production cumulée. L'introduction de cette hypothèse modifie les résultats et conduit également à rejeter la règle d'Hotelling car la production d'une unité aujourd'hui conduit à augmenter le coût de production actualisé des autres unités de ressources dans le futur. Or l'arbitrage intertemporel du producteur nécessite que produire aujourd'hui aux coûts d'aujourd'hui doit être identique à produire demain aux coûts de demain. Dans ces circonstances, le prix de la ressource ne croît plus au taux d'intérêt mais à un taux inférieur (Levhari et Liviatan, 1977; Deverajan et Fisher, 1981) égal au taux d'intérêt moins le pourcentage d'augmentation du coût d'extraction causé par l'augmentation de la production cumulée.

Existence d'un backstop technology (c)

L'introduction d'un backstop technology est une hypothèse intéressante dans la mesure où elle donne la possibilité aux modèles théoriques de postuler l'existence d'une solution mettant fin à la rareté d'une ressource naturelle moyennant le prix d'obtention de ce substitut. Le terme de backstop technology fut employé pour la première fois par Nordhaus (1973, p.248) qui le définit en ces termes :

« Ultimately, if and when the transition is completed to an economy based on plentiful nuclear resources (either through breeder or fusion reactors) the economic importance of scarcity of resources will disappear, and capital and labor costs alone will determine price. This ultimate technology – resting on a very abundant resource base – is the “backstop technology” and is crucial to the allocation of scarce energy resources. »

Nordhaus visualisait alors le prix de la technologie nucléaire (réacteur à neutrons rapides et fusion nucléaire) comme une limite maximale à la croissance du prix d'une ressource épuisable comme le pétrole. D'autres technologies énergétiques comme le solaire ou l'énergie marine peuvent être perçues comme des backstop technology au prix du pétrole car le coût du travail et du capital détermine une grande partie du coût de création de leur énergie et nous pouvons accroître cette énergie sans nous soucier d'une quelconque limite en termes de ressources naturelles³². De la même manière, une technologie onéreuse permettant de substituer l'intégralité des applications du cuivre par de l'aluminium, un des métaux les plus abondants de la croûte terrestre est considérée comme une backstop technology dans l'ouvrage de Gordon et al (1987) et fixe un prix maximum au prix du cuivre. En réalité, il n'existe pas toujours une seule backstop technology mais une multitude tandis que l'incertitude liée à leur survenue et à leur prix est parfois considérable. Aujourd'hui, rien ne permet de dire si c'est l'énergie solaire, les biocarburants ou le charbon liquéfié qui fixeront un prix maximum au prix du pétrole ni même quel sera le prix définitif de cette backstop technology.

L'article de Heal (1976) est à ce point de vue fondateur car il intègre formellement cette hypothèse de backstop technology dans un modèle théorique. Si on suppose un coût marginal constant, les résultats ne diffèrent pas radicalement de ce qui a été présenté dans la section précédente, la rente progresse au taux d'actualisation tandis que le prix progresse à un rythme

³² Nous négligeons là, la pénurie de métaux que pourrait entraîner certaines technologies d'énergie renouvelables et nous nous référons à une situation où celle-ci ne consommeraient que des matières naturelles abondantes.

inférieur à ce taux jusqu'à rejoindre le prix plafond fixé par la backstop technology. Si maintenant, on intègre à la fois une hypothèse de coûts croissants en fonction de la production cumulée et l'existence d'un prix maximum imposé par une backstop technology, les résultats diffèrent totalement de la règle d'Hotelling. En effet, l'hypothèse d'un coût croissant fonction de la production cumulée implique que la différence entre le prix et le coût marginal va se réduire jusqu'à s'annuler arrivé au prix maximum de la backstop technology. La rente contrairement à son comportement postulé dans le modèle d'Hotelling part d'un niveau élevé pour ensuite chuter et s'éteindre arrivée à la date d'apparition de la backstop technology. Il y a cette idée intuitive qui consiste à penser que des stocks de pétrole dont le coût d'extraction est supérieur au prix d'une backstop technologie possèdent une valeur associée nulle. Personne ne paierait pour obtenir ces unités de ressource en terre dont le coût d'extraction est supérieur au prix de la backstop technology.

Conséquences impliquées par l'activité d'exploration (d)

L'activité d'exploration est l'une des activités les plus évidentes pour repousser l'épuisement d'un stock de ressource épuisable. Le recours à cette activité conduit à ajouter des nouvelles unités de ressources en terre au stock du producteur. Il y a d'ailleurs un parallèle entre la rente de rareté et l'activité d'exploration. Comme la rente de rareté peut être définie comme la valeur d'une unité de ressource en terre, l'activité d'exploration doit être menée jusqu'à ce que le coût marginal de cette activité égale cette rente. Le producteur n'ayant pas intérêt à ce que l'ajout d'une unité de ressource à son stock lui coûte davantage (le coût marginal d'exploration) que ce que cela lui rapporte (la rente de rareté). Ainsi en l'absence d'incertitude ou en intégrant l'incertitude et en supposant des producteurs neutres au risque, Devarajan et Fisher (1982a ; 1982b) démontrent que le coût d'exploration est égale à la rente. Toutefois en présence d'incertitude et avec des agents averse au risque, l'égalité entre ces deux mesures est rompue, et le coût marginal attendu de l'exploration est poussé jusqu'à un point où il apparaît comme supérieur à la rente de rareté.

D'une autre façon, le modèle d'Arrow et Chang (1982) montre la possibilité d'une évolution cyclique du prix si le processus de découverte de la ressource suit une loi de poisson. L'objectif de ce modèle visant à expliquer la possibilité d'un prix d'une ressource épuisable ne respectant pas la règle d'Hotelling.

Un autre modèle de Pindyck (1978) repose sur l'existence d'une relation entre le coût d'extraction et le niveau des réserves. Il suppose que le coût de production d'un producteur

augmente quand le niveau de ses réserves diminue tout en admettant que cette relation semble complexe. Le producteur effectuant des découvertes, ajoutent des nouvelles unités de ressources à ses réserves et fait diminuer son coût de production. Dans cette situation, le producteur doit équilibrer production et activité d'exploration. En effet, une nouvelle unité de ressource découverte va permettre (1) de générer un profit supplémentaire égal au prix net du prix d'extraction, (2) réduire le coût d'extraction si elle est stockée. Donc, la dernière unité de réserve devra être découverte lorsque son coût de découverte marginale est égal à la rente de rareté plus la valeur actuelle de réduction des coûts futurs d'extraction. La maximisation du profit du producteur revient à arbitrer entre repousser l'exploration et donc son coût actualisé et subir un coût d'extraction plus élevé du fait de réserves plus basses. Le niveau des réserves initiales va donc jouer un rôle important. Si elles sont importantes, le coût d'extraction sera faible et le producteur repoussera l'exploration à plus tard et réciproquement. Dans le cas où celles-ci seraient initialement faibles, le coût d'extraction est très élevé et le producteur entretient un niveau d'exploration très élevé pour réduire ce coût. Au départ les réserves progressent et le prix chute, mais arrivé à un certain point l'activité d'exploration ne suffit plus à compenser la production, les réserves chutent et provoquent une nouvelle croissance du prix jusqu'à ce que la demande soit annihilée. L'intérêt du modèle de Pindyck (1978) repose sur sa faculté à étayer la possibilité d'une trajectoire du prix en U, ce qui correspondait particulièrement bien à la marche du prix du pétrole à cette époque. Pindyck souligne aussi l'impertinence d'une mesure comme les réserves des producteurs pour estimer la rareté d'une ressource. Les producteurs n'ont pas intérêt à détenir trop de réserves de ressources naturelles car cela implique davantage de fonds dédiés à l'exploration donc un coût d'opportunité élevé attaché à l'utilisation de ces fonds. D'une manière plus globale, l'auteur expose aussi que le prix progresse moins vite et part d'un niveau plus faible en situation d'exploration qu'en situation d'absence d'exploration.

L'activité d'exploration demeure toutefois une activité marquée par une incertitude prégnante, où le rendement est en tout point incertain. Ainsi, Pindyck (1980) dans un second modèle étudie le comportement du producteur face à une incertitude affectant les réserves. Il perçoit l'activité d'exploration comme un moyen de réduire l'incertitude. L'activité d'exploration est alors menée dans l'objectif (1) d'obtenir de l'information et ainsi réduire les variations stochastiques des réserves (seulement si le coût de production est lié aux réserves) et (2) d'accumuler des réserves. L'activité d'exploration varie selon deux termes, un premier terme l'effort d'exploration permet d'accumuler un stock de connaissance et assure ainsi une

diminution de la variance de la fluctuation des réserves au fur et à mesure que ce stock augmente. Le niveau d'effort est non nul lorsque le coût d'extraction dépend des réserves et qu'il y a une valeur à disposer d'information sur ces réserves. Un second terme stochastique reflète l'intégration de l'incertitude dans l'exploration. En effet, mener une activité d'exploration ne garantit pas de découverte certaine. Les principaux résultats de Pindyck tendent à démontrer que l'intégration de variations stochastiques modifie le rythme des changements de prix ou de l'activité d'exploration uniquement si le coût de production ou si la productivité de l'exploration sont intégrés dans le modèle par des variables non-linéaires. Par exemple, dans le cas d'un coût de production non linéaire convexe fonction des réserves, les variations stochastiques des réserves auront tendance à accroître le coût de production moyen, ce qui poussera le producteur à accélérer la production. Par conséquent, les prix partiront d'un niveau plus faible et augmenteront plus rapidement que dans le cas Hotellinien. De la même manière, le niveau d'exploration et son déploiement sont altérés par l'incertitude uniquement si les paramètres ajustant la fonction d'exploration sont non linéaires.

D'autres auteurs, comme Fisher (1978) et Lassere (1985) ont aussi fait la preuve de l'existence d'une rente d'exploration attachée à l'activité d'exploration. En effet, comme l'activité d'exploration est limitée aux quantités de ressources totales à découvrir, l'exploration est perçue comme une activité similaire à l'activité d'extraction d'une ressource épuisable. Il s'en suit que le coût de découverte marginal total représente la somme de deux parties, (1) le coût de découverte marginal et (2) la rente d'exploration. La nullité de ce dernier terme est possible en situation certaine et uniquement sous certaines conditions, à savoir que l'activité d'exploration soit sans limite. D'après Fisher (1978), la rente de rareté est donc égale au coût de découverte marginal moins la rente d'exploration. Or, il est difficile de déterminer le signe de la rente d'exploration *a priori*. Cette rente peut être négative, si les perspectives de découvertes diminuent au fur et à mesure que les découvertes cumulées augmentent. Au contraire la rente d'exploration peut être positive car découvrir permet de mieux connaître les gisements et donc favorise la découverte. Les deux auteurs militent donc pour estimer la rente de rareté par l'évaluation du coût de découverte marginal total.

Fisher (1977) a aussi mis en avant l'existence d'externalités à la fois négatives et positives affectant l'activité d'exploration. Il existe des externalités positives liées à la connaissance conduisant à une sous exploration comme l'ont explicités Peterson (1975) et Stiglitz (1975). Une entreprise d'exploration trouve un intérêt à laisser d'autres entreprises commencer à explorer car elle bénéficie de cette manière d'information gratuite. Si toutes les entreprises

emploient ce raisonnement, l'activité générale d'exploration atteindra un niveau inférieur au niveau optimal requis. A l'inverse, une firme qui explore et découvre des gisements ne diminue pas seulement ses possibilités de nouvelles découvertes futures mais aussi celles des autres entreprises. Les découvertes restantes à venir sont alors perçues comme un bien commun et mènent à une sur-exploration par rapport au niveau existant si l'entreprise était propriétaire des unités à découvrir futures. Ces externalités introduisent des biais dans le comportement des entreprises et les conduits à ne pas suivre les chemins de prix et de productions optimaux.

Qualité de gisement non uniforme (e)

Une des hypothèses du modèle d'Hotelling consistait à supposer que la qualité de la ressource était uniforme. Dans la réalité, la qualité de la ressource durant son exploitation varie au niveau du gisement mais aussi au niveau mondial. Cette différence de qualité peut s'expliquer à la fois par une différence de concentration, de nature ou d'accessibilité de la ressource naturelle. Par exemple, l'exploitation de l'aluminium au niveau mondial requiert d'extraire l'aluminium de différents gisements de bauxite dont la concentration n'est pas identique et donc dont les coûts d'extraction ne sont pas identiques. De la même manière, deux gisements contenant de l'aluminium peuvent détenir le même niveau de concentration mais leur différence de nature (silicate d'aluminium et bauxite) obligent les producteurs à employer des procédés aux coûts différents. Or les différents coûts d'extraction d'une ressource naturelle entraînent des conséquences importantes sur la formation du prix de la ressource. En effet, l'exploitation simultanée de plusieurs gisements dont les coûts sont différents est impossible et inefficace, sauf bien entendu s'il existe des contraintes de production sur la ressource au plus faible coût (Solow et Wan, 1976). La démonstration de Solow et Wan consiste à considérer un problème de gestion des coûts actualisés de deux gisements de qualités différentes durant deux périodes temporelles. Le modèle est présenté en temps discret avec deux périodes. On ne peut pas avoir des quantités de production positives du gisement le plus cher en période 1 et du gisement le moins cher en période 2 car ce choix conduirait à un niveau de consommation sous optimal. En effet, il suffirait de substituer un peu de production de la ressource à coût élevée en période 1 par de la production de la ressource à bas coût de la période 2 pour obtenir directement une réduction des coûts en période 1 qui pourrait être investit et fournir ensuite un revenu supplémentaire en période 2 supérieur à l'augmentation des coûts d'extraction. Si l'économie n'est pas saturée par du capital reproductible, il n'y a donc aucune raison d'utiliser une ressource plus onéreuse car le surplus dégagé peut ainsi être

réinvestit et augmenter la production dans la période suivante. Les résultats de cette conclusion restent valables lorsqu'ils sont élargis à un modèle avec davantage de période. Ce qu'il faut retenir, c'est que tant qu'il existe une ressource à meilleur coût non épuisée, une ressource à plus haut coût ne peut pas rentrer en production. L'optimum requiert donc d'épuiser les différentes qualités de ressources l'une après l'autre dans un ordre décroissant de qualité. Le prix dans cette situation suit la règle de Hotelling mais seulement sur chaque portion d'exploitation d'une qualité de la ressource. Comme l'expliquent Levhari et Liviatan (1977), la règle de Hotelling ne tient plus lorsqu'on observe l'évolution du prix de la ressource lorsqu'on bascule d'une qualité vers une autre. L'optimum nécessite que la valeur présente du profit marginal soit discontinue lorsqu'on remplace une qualité de ressource par une autre épuisée (voir Fisher, 1977). Dans cette situation, le prix croît en moyenne moins rapidement que le taux d'actualisation sur l'ensemble de la période d'extraction de la ressource. La véracité de cette règle d'exploitation du gisement le moins cher vers le gisement le plus onéreux ne tient qu'en la présence d'information parfaite sur les tous les gisements. Plusieurs auteurs ont montré que la réalité (Cleveland et Kaufman, 1991 ; Ozdemiroglu, 1993) ne permet pas d'observer ce type de schéma d'exploitation. Cette situation s'apparente au *Mayflower problem*³³ identifié par Douglas Reynolds (1999). Au début de l'exploitation d'une ressource les agents économiques ne bénéficient pas de la totalité de l'information sur les gisements, ce n'est donc pas forcément les gisements les moins onéreux qui rentrent en production en premier.

L'incertitude portée sur l'offre ou la demande (f)

L'intégration de l'incertitude dans les modèles néo-hotellinien a fait l'objet d'une attention toute particulière car elle s'apparente à un trait fondamental de la réalité des marchés. Rapidement, les économistes ont cherché à comprendre la prise de décision des agents économiques en situation d'incertitude. Le champ d'application de l'incertitude s'étend à l'offre et à la demande future tout en affectant les droits de propriétés.

Concernant l'incertitude liée à la demande future, Weinstein et Zeckhauser ont proposé en 1975 un modèle à deux périodes déterminant les conditions d'équilibre d'un marché d'une ressource épuisable lorsque la demande future n'est connue qu'au début de chaque période. L'incertitude est présente à chaque période mais l'est moins dans le futur proche que dans le

³³ Les émigrants européens accostant sur la côte est de l'Amérique du Nord en 1620, bien qu'à la recherche des terres les plus fertiles ne mirent pas en production celles des grandes plaines mais celles du Massachusetts beaucoup moins fertiles car ils ne disposaient pas de l'ensemble de l'information sur les terres américaines.

futur lointain. Les auteurs parviennent à des conclusions différentes suivant qu'ils postulent que les agents sont neutres ou averses au risque. En cas de neutralité face au risque, le chemin de prix de la ressource croît au taux d'actualisation. Au contraire, en cas d'aversion au risque, le prix attendu de la ressource va croître à un taux supérieur au taux d'actualisation conduisant à une sous-conservation de la ressource par rapport à l'optimum social en termes de surplus actualisé. Lewis (1977) parvient à des résultats opposés en supposant que le risque est réparti uniformément sur la demande dans le temps. Le producteur devrait sous cette hypothèse vouloir repousser l'extraction dans le futur là où la production et le montant du risque sont faibles.

L'incertitude pèse aussi le facteur offre, que ce soit par le coût d'extraction futur, le niveau du stock restant, le bénéfice tiré de l'exploration, le coût et le délai d'apparition d'une *backstop technology* (Krautkraemer, 1998). Dans le cas d'un stock fixe de ressource de qualité uniforme et d'une taille inconnue, le producteur produira moins vite que dans une situation où il sait que la taille du stock est égale à la valeur espérée de la distribution de probabilité initiale (Kemps, 1976 ; Gilbert, 1979, Loury, 1978). D'autres universitaires comme Deverajan et Fisher (1982b) jugent que l'incertitude impacte le niveau d'activité de l'exploration sans toutefois déterminer le sens de cet effet. D'une autre façon, Pindyck (1980 ; 1981) introduit l'incertitude au niveau de la demande, de l'exploration et du prix grâce à un procédé stochastique. Ainsi plus l'incertitude au niveau du prix³⁴ (Pindyck, 1981) est importante plus cela renforce l'hypothèse d'une réduction du rythme d'extraction de la ressource via l'exercice d'une option du producteur. En effet, d'après Pindyck, les ressources en terres peuvent être vues comme une option sur la production future de la ressource. Si le prix de la ressource future devient plus élevé que son coût, il devient rentable d'exercer l'option et de produire la ressource, alors que dans le cas contraire, l'option n'est pas utilisée et la seule perte à enregistrer s'élève au coût de la découverte ou au coût d'achat de la réserve.

Une autre hypothèse intéressante consiste à considérer une économie évoluant dans un monde risqué où il existe deux biens (une commodité et un bien composite) et trois types d'actifs (la commodité, le capital physique, et une obligation sans risque). A la fois, le processus d'extraction, de production et donc le coût de production du bien composite et d'extraction de la commodité sont stochastiques. Dans ces conditions, la théorie d'équilibre d'un portefeuille d'actif nous permet de comprendre que le rendement de la commodité épuisable sera égal au

³⁴ Le prix de la ressource épuisable suit ici un chemin de croissance exogène avec des variations stochastiques auteurs de ce trend.

taux d'intérêt plus un premium de risque égal à la covariance entre le taux de variation de la rente de rareté de la commodité et le taux de variation de la consommation du bien composite (Gaudet, 2007). Si cette covariance est positive, détenir la commodité est alors perçu comme risqué, le détenteur exigera donc un rendement supérieur et réciproquement. Il est alors possible avec une covariance suffisamment négative d'obtenir un prix stable voire déclinant de la commodité.

De manière générale, Hartwick et Olewiler (1986) montrent que les prix courants s'accroissent et que la vitesse d'extraction diminue au fur et à mesure que l'incertitude augmente³⁵.

L'incertitude frappe aussi les droits de propriétés. Les droits propriétés conditionnent de façon importante la stratégie des acteurs. Dans certains pays, l'existence de gouvernements faibles ou corrompus pousse les entreprises à accélérer l'extraction d'une ressource épuisable, car rien ne garantit que le régime de taxation ou de détention de la ressource ne soit pas modifié de manière unilatérale. Ainsi, une entreprise privée sous la menace d'une nationalisation, d'une expropriation ou de l'apparition soudaine d'un substitut aura tendance à accélérer la vitesse de la production d'une ressource épuisable (Deverajan et Fisher, 1981). Cette explication a d'ailleurs conduit certains auteurs à la conclusion que le premier choc pétrolier relevait davantage d'une hausse de l'incertitude sur les droits propriétés que de l'exercice d'un pouvoir de marché (Gaudet, 2007).

Le recyclage (g)

La possibilité du recyclage modifie considérablement les conclusions d'Hotelling puisque même dans le cas d'une ressource épuisable, une unité de ressource épuisable n'est pas détruite par sa consommation. L'introduction d'une hypothèse de recyclage peut être très instructive sur l'évolution du prix des ressources non énergétiques épuisables mais durables comme les métaux ou les minéraux. Le prix de ces ressources épuisables dépend en toute logique et à contrario des ressources énergétiques davantage du stock de la ressource en circulation que du flux de production de la ressource. Comme le montre Gordon et al. (2006), le stock de cuivre en circulation aux Etats-Unis est d'environ 250kg par tête alors que le flux supplémentaire de cuivre ajouté dans le circuit économique est inférieur à 10kg par tête. Par ailleurs, certains auteurs remarquent que la règle d'Hotelling ne permet pas d'apprécier la trajectoire des prix des métaux et minéraux historiques (voir Figure 2-10).

³⁵ Sous réserve, d'une élasticité-prix de la demande constante.

Stewart (1980) fait partie des premiers auteurs à intégrer la possibilité du recyclage dans un modèle d'équilibre compétitif en temps discret. Sous l'hypothèse que la ressource soit partiellement durable (se dépréciant sur le temps), il parvient à la règle d'Hotelling. Levhari et Pindyck (1979) admettent que ce résultat est techniquement juste mais ajoutent que cela nécessite un montant illimité de production en première période pour apporter directement le stock de ressource à sa valeur maximale. De cette manière, si on admet que la ressource est partiellement durable (c'est-à-dire est sujette à une dépréciation physique) et qu'on suppose une dépréciation du stock supérieure à la production, nous parvenons à un stock de ressource déclinant en circulation et une croissance stable du prix de la ressource compatible avec la règle d'Hotelling. C'est pourquoi les auteurs reconsidèrent les résultats de Stewart en supposant que la ressource est durable ou partiellement durable couplé avec une demande stable ou suivant une croissance autonome. Dans leur article les auteurs prennent comme hypothèse un coût marginal croissant.

- Dans le cas d'une ressource parfaitement durable (pas de dépréciation) et d'une demande stable, le stock croît à un taux décroissant jusqu'à épuiser les réserves de la ressource (ou de manière asymptotique à une limite quand les réserves sont très élevées). Le prix suit alors un chemin continuellement décroissant que la contrainte de ressource naturelle soit liée ou pas.
- Dans le cas d'une ressource partiellement durable (taux de dépréciation positif), d'une demande stable et de réserves faibles, le stock progresse à taux décroissant jusqu'à un point où la croissance de la production devient inférieure au taux de dépréciation, le stock régresse alors jusqu'à 0. Le prix suit alors une trajectoire en U. Les auteurs apprécient aussi le cas où la contrainte des réserves disponibles ne joue pas, la croissance de la production chute alors asymptotiquement non plus à 0 mais au taux de dépréciation du stock de la ressource en circulation. Le prix chute alors de façon monotone jusqu'à atteindre un équilibre de long terme.
- Enfin dans le cas d'une ressource partiellement durable, d'une demande croissante et de réserves suffisamment faibles, le stock croît puis décroît comme dans la situation précédente avec une croissance de la production déclinant jusqu'à 0. Le prix adopte également un chemin en U. Les auteurs notent toutefois la possibilité d'un prix croissant dès l'origine si le taux de dépréciation du stock est suffisamment élevé.

Dans toutes les situations Levhari et Pindyck remarquent que le postulat d'un coût marginal croissant rend caduque la règle d'Hotelling que la ressource soit totalement ou partiellement durable.

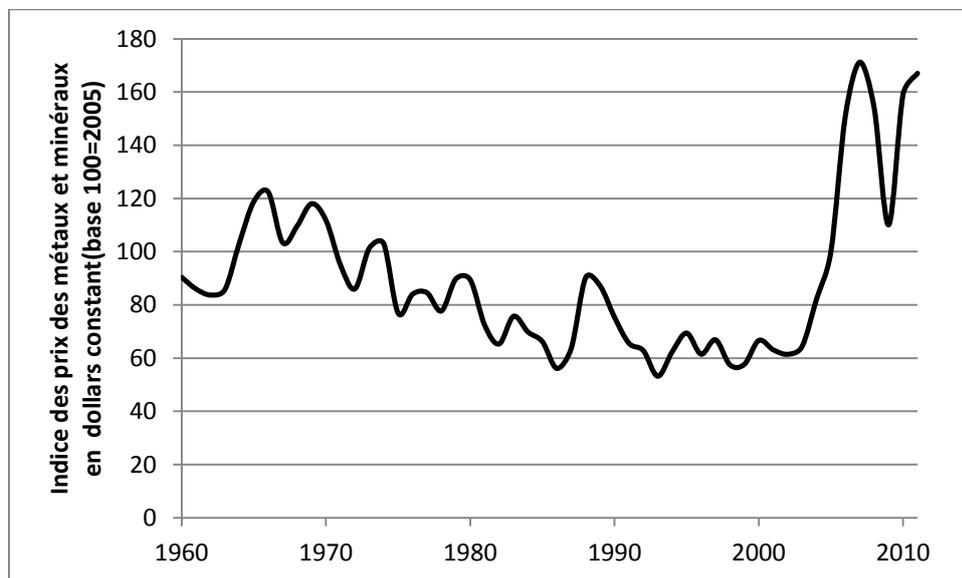


Figure 2-10 Evolution de l'indice des prix des métaux et minéraux en dollars constant, Données : Banque Mondiale et calculs de l'auteur

Effet du progrès technique (h).

Les effets du progrès technique furent envisagés de diverses manières. Dans l'article de Slade (1982), un modèle alliant un progrès technique exogène pallie les augmentations du coût marginal suite à une diminution de la concentration de la ressource. Si le progrès technique évolue à un rythme assez rapide, il entraîne une chute du coût marginal à un taux décroissant. Cette chute du coût marginal provoque une chute du prix finalement suivie d'une remontée de celui-ci suite au poids croissant de la rente de rareté dans le prix. En effet lorsque la décroissance du coût marginal pondérée par sa part relative dans le prix devient inférieure à la croissance de la rente de rareté pondérée par sa part relative dans le prix, le prix total intégrant la rente de rareté et le coût marginal se remet à croître. Slade propose de cette manière une explication plausible de l'évolution empirique du prix de nombreuses matières premières.

D'autres auteurs sont au contraire beaucoup moins optimistes sur l'effet du progrès technique et suggèrent que le progrès technique peut au contraire accélérer l'épuisement (Farzin, 1995) d'une ressource naturelle ou charrier des risques économiques et non économiques importants (Fauchaux, 2005). Une citation de Jean Laherrère, un ancien géologue de Total et directeur de l'Association for Study the Peak Oil résume assez bien cette possibilité du progrès technique :

« La technologie n'augmente pas les réserves, la technologie vide le puits plus vite ».

Le syndrome de l'évolution de la taille et la puissance des bateaux de pêche pour contourner la réglementation environnementale (quotas de navires) et accélérer l'épuisement des bancs de poissons est souvent repris pour évoquer ce côté sombre du progrès technique. De la même manière, la formidable évolution des moyens miniers mis à disposition de l'homme pour extraire les ressources du sol ont permis une baisse des coûts grâce à des économies d'échelles mais au détriment d'une exploitation plus importantes de ressources et de terrain.

Dans son article principalement centré sur l'étude des relations entre les trois mesures économiques de la rareté (le coût, la rente et le prix), Farzin introduit trois types de progrès technique :

- Un progrès technique biaisé affectant seulement le coût d'extraction marginal³⁶. Ce progrès technique réduit le coût marginal d'extraction actuel ce qui autorise un épuisement plus rapide de la ressource donc fait progresser plus rapidement le coût de déplétion marginal et la rente de rareté.
- Un progrès technique biaisé affectant uniquement le coût de déplétion marginal³⁷. Farzin ne fournit pas d'exemple de ce type d'innovation mais on peut imaginer qu'un progrès technique permettant par exemple d'abaisser le coût d'accès à de nouvelles ressources en pétrole non conventionnelles relève de ce type d'innovation. Ce progrès technique ralentit la progression de l'effet de stock et la vitesse de progression de la rente de rareté. Alors que le premier type de progrès technique n'influe pas sur le type de relation qu'il peut exister entre les trois mesures de rareté³⁸ en l'absence de progrès technique, cette deuxième catégorie de progrès technique perturbe la stabilité de cette relation.
- Un progrès technique neutre réduisant à la fois le coût marginal d'extraction et le coût marginal de déplétion. Ici, Farzin suppose que ce type d'innovation réduit proportionnellement le coût de déplétion et le coût marginal d'extraction. Le résultat final dépendra des valeurs des élasticités du coût marginal de déplétion et du coût marginal d'extraction en fonction de la vitesse d'extraction. Si l'élasticité du coût marginal de déplétion est inférieure à l'élasticité du coût marginal d'extraction, les

³⁶ Farzin emploie l'expression *extraction-biased technological change*.

³⁷ Désigné par Farzin comme *a depletion-biased technological change*.

³⁸ On fait ici référence aux coûts, prix et rentes économiques.

relations entre les trois mesures sont perturbées par ce progrès technique neutre, dans le cas contraire les relations tendent à être renforcées.

Les théories liées à l'équité intergénérationnelle, au taux d'actualisation et à la durabilité de la croissance (i).

Le courant néo-hotellinien a aussi développé les questions sous-jacentes à la problématique de l'équité intergénérationnelle. En effet, la consommation d'une ressource épuisable engendre nécessairement des questionnements d'équité entre les générations. L'adoption d'une répartition équitable de la consommation d'une ressource épuisable entre la génération actuelle et les générations suivantes (par définition en nombre infini) revient à ne consommer aucun montant de la ressource épuisable. Deux questions principales ont été abordées par le courant néo-hotellinien pour résoudre ce dilemme, d'une part les conditions nécessaires pour que la stabilité du niveau de vie par tête soit maintenue au cours du temps et d'autre part le rôle du taux d'actualisation dans la détermination du niveau de consommation de la ressource par tête.

Sur la question de l'équité intergénérationnelle, quatre auteurs ont développé des thèses sur la soutenabilité de la croissance et l'équité intergénérationnelle (Solow, 1974a ; 1974b ; Stiglitz, 1974 ; 1979 ; Dasgupta et Heal, 1974). Les néo-hotellinien souhaitent s'assurer par l'usage de modèles de croissance de la faisabilité d'un chemin de croissance ou du maintien du niveau de vie par tête. Le principe des modèles de croissance est renouvelé avec l'ajout d'une variable associée aux ressources naturelles. Les fonctions de production prennent des formes différentes³⁹ mais comprennent la plupart du temps trois facteurs : le travail (L), le capital (K) et les ressources naturelles (R) auquel on rajoute parfois le progrès technique. Nous donnerons quelques résultats importants selon la configuration des modèles. Tout d'abord Stiglitz (1974) montre qu'un maintien de la consommation par tête demeure possible si la vitesse du progrès technique consacrée à augmenter la productivité des ressources naturelles est plus rapide que la croissance de la population. Ce résultat est similaire aux conclusions obtenues par Herfindhal et Kneese (1974). Autre conclusion importante, la présence de rendements d'échelle croissants permettrait de s'abstraire d'une partie du progrès technique nécessaire pour diminuer l'impact de la décroissance du stock de ressources naturelles. D'autres auteurs (Solow ; 1974a ; 1974b) ont fait le choix d'exclure la possibilité du progrès

³⁹ Solow (1974) et Stiglitz (1974) adoptent des fonctions de production de type Cobb-Douglas tandis que Dasgupta et Heal (1974) recourent à une fonction plus générale de type CES.

technique dont la pérennité peut apparaître comme contestable sur le très long terme. Or, en l'absence de progrès technique et de croissance de la population, un chemin de consommation constant est soutenable si la part du facteur capital dépasse la part du facteur ressources naturelles dans la production (Solow, 1974a). De façon plus générale, Dasgupta et Heal (1974) exposent la possibilité d'un chemin de consommation par tête non décroissant si l'élasticité de substitution entre le capital et les ressources naturelles est supérieure à un. Dans le cas d'une élasticité de substitution entre le capital et les ressources naturelles égale à un, la part du capital dans la production doit en plus être supérieure à la part des ressources naturelles dans la production. Victor (1991) conteste ces résultats dans la mesure où le capital n'est pas produit à partir de rien mais à partir d'autres facteurs⁴⁰. C'est un produit intermédiaire (Cleveland, 1991a).

Autre point de crispation, la méthode d'actualisation a soulevé des critiques extérieures (voir Goergescu-Roegen), mais également des oppositions internes. Ainsi certains économistes comme Ramsey estiment que l'utilité future ne devrait pas être actualisée (Gordon, 1966). Peterson et Fisher (1977) admettent que l'actualisation est dénuée d'éthique mais que sans elle, il n'existe pas d'optimum. L'actualisation reflète pourtant la réalité et le comportement des agents orienté vers la préférence pour le présent. Sans rentrer dans des considérations qui incluent nécessairement des jugements de valeurs, on peut légitimement se demander si cette myopie pour l'avenir due à la finitude de la vie humaine est vraiment optimale à l'échelle de la société dont la durée de vie est beaucoup plus longue que celle de l'homme. Certains humanistes s'offusquent des conséquences de cette méthode très proche d'une devise connue : « après nous le déluge ». Solow et Stiglitz avancent que l'absence des générations futures sur les marchés actuels couplée à l'actualisation de leur utilité ne signifie pas que celles-ci ne soient pas pris en compte. Leurs préférences sont tout simplement intégrées dans les préférences des agents actuels qui tiennent compte de l'utilité future de leurs enfants et petits enfants. D'autres économistes doutent de cette préoccupation pour l'équité intergénérationnelle sachant l'intérêt mineur porté par l'homme à l'équité intragénérationnelle au niveau mondial (Lopez, 2005). La plupart des néo-hotelliniens estiment équitable une distribution inégale des ressources naturelles parmi les générations au prétexte que les générations futures percevront davantage de technologie et de capital ce qui leur permettra de produire autant voire plus avec un montant inférieure de ressources naturelles (Stiglitz, 1979).

⁴⁰ Voir la démonstration en annexe 2.1.

Par ailleurs, les économistes ont su relever plusieurs paradoxes indépendants de considérations éthiques :

- Les entreprises exploitant la ressource n'ont pas nécessairement le même taux d'actualisation que celui utilisé par la société notamment du fait de la présence d'une prime de risque positive (Gordon 1966). Ceci s'explique par des capacités de diversification du risque différente à l'échelle d'une entreprise et à l'échelle d'une société dans son ensemble. Le taux d'actualisation privé pourrait donc différer du taux d'actualisation public ou social.
- Autre point de discordance, la baisse du taux d'intérêt ne déboucherait pas nécessairement sur un ralentissement de la vitesse d'exploitation d'une ressource naturelle (Gordon, 1966; Fisher et Krutilla, 1975; Farzin, 1984). En effet, une baisse du taux d'intérêt conduit le producteur à réorienter davantage sa production vers le futur (effet de conservation) mais cela implique aussi une stimulation du capital extractif via l'investissement. Par conséquent la baisse du taux d'intérêt signifie aussi que le coût du capital mis à disposition pour extraire la ressource est moins cher, ce qui peut entraîner une hausse de la production. L'effet total⁴¹ dépendra donc du degré d'intensité capitalistique du secteur extractif et du secteur produisant un substitut, de l'élasticité de l'investissement face à une baisse du taux d'intérêt, de la taille du stock de la ressource naturelle voire de l'influence du taux d'intérêt sur le secteur de l'exploration. Le nombre de variables impliquées par l'impact d'une variation du taux d'intérêt rend très probable une évolution non monotone de l'effet total. Plusieurs simulations réalisées par Stollery (1987 ; 1990) semblent indiquer que les valeurs probables des paramètres propres à l'industrie du cuivre et du charbon concourent à un effet total non monotone (Figure 2-11). Ainsi pour des valeurs élevées du taux d'intérêt une baisse du taux d'intérêt accroît légèrement la vitesse d'épuisement de la ressource (T diminue), l'effet de stimulation de l'investissement domine alors l'effet conservation. Au contraire pour des taux d'intérêt plus faibles, la baisse du taux d'intérêt devrait amener l'exploitant à ralentir la vitesse d'extraction de la ressource (T augmente), l'effet conservation domine alors l'effet d'investissement.

⁴¹ Par effet total, on désigne l'accélération ou décélération de la vitesse d'extraction de la ressource.

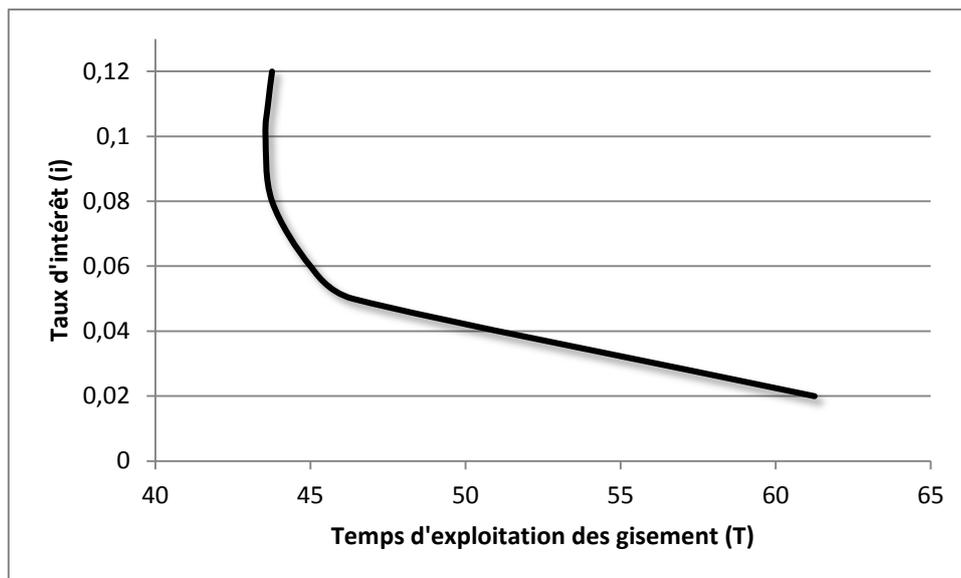


Figure 2-11 Simulation de l'effet du taux d'intérêt sur le temps d'exploitation des gisements de cuivre Canadien, Source : données de Stollery (1987), calculs de l'auteur

5.2 Skinner : une explication géologique de la substitution à venir des métaux rares vers les métaux abondants

Le mouvement initié par Skinner (1976) regroupe la pensée de plusieurs universitaires dont la vocation principale est de proposer une explication géologique du phénomène d'épuisement des ressources naturelles. Cette théorie, à l'instar de celle d'Hubbert (1956), suppose que l'offre des ressources naturelles épuisables est guidée en premier lieu par des facteurs géologiques. Ce mouvement nourrit néanmoins des oppositions importantes avec celui d'Hubbert, notamment sur la forme de la distribution géologique des ressources même si les deux auteurs identifient la même force de salut (la substitution) comme solution ultime à l'épuisement d'une ressource. La thèse de Skinner s'applique uniquement aux métaux et aux ressources minérales contrairement à celle d'Hubbert initiée sur les hydrocarbures.

A la différence des partisans d'Hubbert et de l'école de Princeton, les disciples de Skinner et de l'école de Yale soutiennent, pour les éléments rares, une distribution bimodale de la répartition d'un élément dans la croûte terrestre en fonction de sa concentration. Il existerait deux grandes familles de métaux : les métaux communs et rares au sens de la concentration géologique. Les métaux communs⁴² qui composent l'essentiel de la quantité de métaux dans la croûte terrestre sont supposés avoir une distribution uni-modale log-normale comme l'a proposé originellement Ahrens (1954). Au contraire, pour les métaux rares au sens

⁴² On désigne par métaux communs : le fer, l'aluminium, le silicium, le magnésium, le manganèse, et le titane.

géologique, la distribution de ces éléments dans la croûte terrestre suivrait par hypothèse une distribution log-normale bimodale (Figure 2-12).

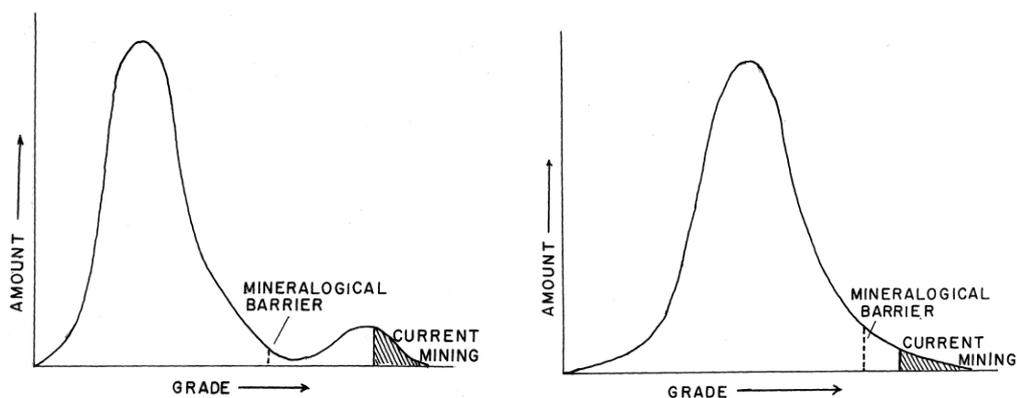


Figure 2-12 Distribution bimodale et unimodale de la présence d'un élément en fonction de sa concentration, Source : Skinner (2001, p.20-21)

En effet, la concentration moyenne des éléments rares dans la croûte terrestre est largement inférieure à 100 ppm (0,01%) en comparaison des éléments communs dont la concentration moyenne est évaluée en dixième de pourcentage voir en pourcentage. Or à un niveau si faible de concentration, les métaux rares n'apparaissent pas sous la même forme qu'à des niveaux élevés de concentration. Ils sont en effet présents non plus sous la forme de « grains » mais disséminés dans la maille cristalline d'autres minerais. Ils se substituent alors au niveau atomique à des éléments communs⁴³ dans la maille cristalline de minerais abondants comme les silicates. Cette forme différente a des conséquences particulières notamment en termes de coûts énergétiques et économiques (Figure 2-13). Le niveau de concentration auquel survient ce changement de forme chimique de l'élément est appelé la barrière minéralogique et dépend de chaque élément.

Cette différence de forme chimique de l'élément n'explique toutefois pas pourquoi il existe deux pics dans la distribution naturelle de l'élément. Skinner s'appuie sur une distribution de probabilité pour étayer ce type de courbe. Pour obtenir des gisements concentrés de métaux rares (comme le cuivre), il faut la conjugaison de plusieurs facteurs géologiques (ayant chacun une probabilité définie) pendant une certaine durée de temps pour concentrer suffisamment un élément sous une forme économiquement extractible. Le produit de ces événements nous donne la probabilité d'obtenir ce type de gisement. Lorsqu'il manque un de

⁴³ Le plomb substitue par exemple à l'échelle atomique le potassium et le zinc remplace le magnésium dans les roches communes.

ces facteurs l'élément n'est pas concentré sous une forme chimiquement différente de celle à laquelle il apparaît naturellement en moyenne dans la croûte terrestre.

Cette barrière minéralogique a deux conséquences notoires sur l'économie des métaux rares :

- Au fur et à mesure que nous épuisons les gisements de haute qualité des métaux rares, la quantité de gisements potentiels de plus basse qualité va décliner et non pas s'accroître. Le coût énergétique d'extraction va donc progresser au fur et à mesure que la concentration du métal diminuera (Singer, 1977) mais les quantités disponibles vont en parallèle s'amoinrir.
- Pour à nouveau voir croître la quantité potentiel de l'élément extractible, il faudra exploiter l'élément dans des configurations où sa concentration est inférieure à la barrière minéralogique. Or extraire cet élément de la maille cristalline de la roche revient à briser entièrement celle-ci chimiquement ce qui réclame des quantités colossales d'énergie. Le coût énergétique d'exploitation des gisements d'un élément rare par ordre décroissant de qualité devrait donc suivre une fonction de type exponentielle discontinue comme postulé par Brobst (1979). Le saut effectué par la fonction de coût pourrait être un multiple de 10 (Skinner, 2001), de 100 ou 1000 (Brobst, 1979 ; Skinner, 1976).

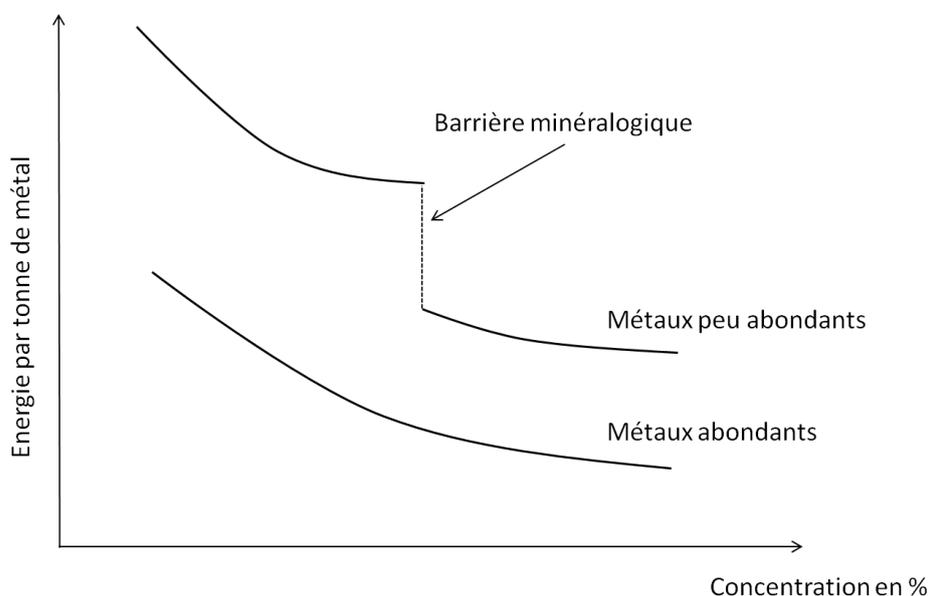


Figure 2-13 Evolution du coût énergétique par tonne de métal en fonction de sa concentration, Source : Brobst (1979, p.128)

Infirmier ou valider cette distribution est relativement difficile compte tenu de la connaissance actuelle fortement biaisée en faveur des gisements de haute qualité (Singer, 1977). Comme les

gisements de basse teneur ne sont pas exploitables commercialement, nos connaissances à leur propos sont très limitées et largement inférieures à ce que l'on sait sur les gisements de meilleurs qualités. Un article de Deffeyes et Mcgregor (1980) simulant la pente de la distribution naturelle de l'uranium en fonction des données minières connues dévoilent une pente ascendante de distribution de l'uranium en fonction de la concentration et cela à différents niveaux de concentration. Les auteurs estiment pouvoir, par conséquent, infirmer la thèse de Skinner bien qu'ils admettent que celle-ci s'applique correctement au cas du chrome. Néanmoins, la simulation de cette pente générale de la distribution de l'uranium est effectuée pour des niveaux de concentration assez élevés pour lesquels on dispose de données, or Skinner suppose dans son article original que la barrière minéralogique de l'uranium devait être très basse (inférieure à 0,01%). Plus récemment, un groupe d'auteurs (Menzie et al., 2005) sur la base des connaissances mondiales des gisements de cuivre invalide l'hypothèse d'une relation inverse entre tonnage et concentration d'un métal soit l'hypothèse retenue par l'école de Princeton. Au contraire, la distribution cuivre semble suivre le schéma postulé par Skinner (voir Figure 2-12) pour les métaux rares même si les auteurs n'identifient pas non plus le deuxième pic de la distribution bimodale.

Skinner met également en évidence que le nombre de gisements contenant plus d'un million de tonne d'un métal est proportionnel à son abondance dans la croûte terrestre. Ce phénomène est similaire à la proportionnalité empirique observée entre les réserves découvertes et l'abondance géologique d'un métal dans la croûte terrestre découvert par McKelvey (1960). Comme les réserves de plusieurs métaux rares sont épuisées à des rythmes proportionnellement à leur concentration dans la croûte terrestre beaucoup plus rapides que les métaux communs, on en déduit que les premiers viendront à manquer avant les seconds. C'est pourquoi, Skinner estime très probable, le basculement prochain des nos économies vers un nouvel âge du fer où les métaux communs se substitueront aux métaux rares dans les usages courants de ces derniers. Cette position soutenant la substitution à venir des métaux rares par les métaux communs du fait d'un épuisement plus rapide est partagée par d'autres auteurs (Goeller et Weinberg, 1978 ; Diederer, 2010). D'autres universitaires comme Phillips et Edwards (1976) ont également démontré la possibilité d'expliquer de façon satisfaisante les niveaux de prix de chaque métal en fonction de la concentration moyenne de leur gisement et de la consommation énergétique théorique requise pour le raffinage. Ce qui milite en faveur de facteurs géologiques comme déterminant principaux de la valeur d'une ressource naturelle.

Finalement, Skinner apparaît à la fois comme en rupture et en accord avec la vision traditionnelle économique. En accord avec cette vision car l'effet de substitution qu'il envisage atténue voire annihile l'essentiel des conséquences néfastes pour la croissance économique. En rupture aussi car la barrière minéralogique associées aux métaux rares anéantit l'efficacité de l'accroissement du stock de ressources extractibles grâce à l'effet prix. Son attachement à certains mécanismes du paradigme néo-Hotellinien le conduisit d'ailleurs à superviser une synthèse des deux courants appliquée au cas du cuivre (Gordon et al., 1987).

5.3 *Simon et les abondancistes : le savoir comme rempart à l'épuisement des ressources*
Simon au travers de *The Ultimate Resource* (1981) et *The Ultimate Resource 2* (1996) incarne avec d'autres (Beckerman, 1995a, 1995b), le courant des abondancistes. Ces économistes s'opposent vigoureusement aux conclusions tirées par le Club de Rome, Ehrlich⁴⁴ et plus généralement par l'approche biophysique. Les ressources naturelles ne pourraient pas constituer une limite à la croissance car l'effet substitution et le progrès technique repousseraient sans cesse la rareté de ces dernières. Ces économistes constituent en quelque sorte une branche radicale du courant néo-Hotellinien croyant au pouvoir de l'homme et du marché pour atténuer la rareté de l'épuisement d'une ressource. Tilton (1996) identifie ce courant comme celui des abondancistes (*Cornucopians*) via le paradigme du coût d'opportunité en opposition au paradigme du stock fixe. Pour Simon, les ressources naturelles ne sont pas limitées et l'accroissement de la population pourrait exercer un impact bénéfique sur la situation des ressources.

Sur la vision des limites tout d'abord, Simon estime que cette approche est dénuée de sens car les limites sont sans cesse remises en cause par l'extension géographique (ressources immergées, lunaires...) et par la nature de la ressource⁴⁵ (basculement entre ressources conventionnelles et non conventionnelles). Ensuite, en dernier lieu, la substitution vers d'autres types de ressources et d'énergie suffit à repousser la rareté définitivement. D'après Simon, il ne peut donc y avoir de limite qu'en établissant une définition étroite des ressources.

Concernant la population, Simon avance une théorie largement en rupture avec la théorie économique néoclassique démographique, consistant à percevoir celle-ci comme la source de création du progrès technique. Ainsi, une population plus importante impliquerait une création

⁴⁴ Simon alla même jusqu'à engager des paris pour conforter la véracité de ses conclusions (Simon, 1981). L'issue du pari engagé avec Ehrlich sur le fait qu'un panier de ressources naturelles allait ou non devenir plus onéreux dans le futur ne désigne pas la théorie la plus réaliste mais simplement celui à qui la chance sourit (Kiel et al, 2010, Lawn, 2010).

⁴⁵ Beckerman (1995a) use de la même rhétorique dans son chapitre 4 consacré à la finitude des ressources, p.49.

plus importante de connaissances, toutes choses égales par ailleurs (Simon, 1981, p.210). Elle permettrait aussi l'utilisation généralisées d'économie d'échelle grâce à des machines plus grosses donc plus efficaces⁴⁶, une plus grande division du travail et rentabiliserait des investissements sociaux dans les communications et les transports (rails, système d'irrigation, ports...). Simon ne nie pas que la création d'une population plus importante possède un coût : celui de nourrir une population inactive durant une période transitoire égale à sa période de formation, toutefois ce coût serait inférieur aux bénéfices générés dans la période suivante. Simon conteste l'idée même d'une loi des rendements décroissants affectant les ressources naturelles (1981, p.53) qui pourrait exister à une échelle réduite (au niveau d'un gisement) mais absolument pas au niveau général.

Finalement, c'est la puissance du mécanisme de prix qui assurerait à l'homme une correction rapide de la situation via le signal de rareté (Beckerman 1998). Le prix des ressources naturelles importerait peu, et c'est le prix des services qui les incorporaient qui compterait. Or l'effet substitution garantirait le maintien du prix des services à un niveau égal voire inférieur grâce à l'accélération du progrès technique permis par une population plus nombreuse. En d'autres termes, si les forces du marché seraient libres d'opérer, l'épuisement d'une ressource naturelle ne pourrait tout simplement pas avoir lieu (Houthakker, 2002).

Les critiques engagées contre les thèses de Simon et Beckerman sont nombreuses mais nous nous limiterons à celles évoquées dans l'article de Daly (1995), Swanson (1996) et Trainer (1986). Pour commencer, Trainer reproche à Simon de fonder ses arguments uniquement sur des perspectives passées du trend des prix des ressources naturelles. La réussite du progrès technologique dans le passé pour repousser la rareté des ressources naturelles ne serait en rien une garantie de leur abondance dans le futur. Dans la même veine, il y aurait des limites théoriques au progrès technique qui commenceraient à être constatées dans certains secteurs. Par ailleurs, l'existence de rendements d'échelle croissants ne signifierait pas que la population plus importante ait une pression environnementale totale plus faible. Nous devrions donc redouter la pollution générée par une population plus nombreuse. La pertinence des indicateurs choisis par Simon soulève quelquefois des interrogations comme par exemple l'espérance de vie pour évaluer l'évolution de la pollution. Concernant l'annulation des coûts de la population par la génération avec davantage de connaissances et d'innovation, Trainer soutient que cette thèse serait largement infirmée par les faits empiriques. Enfin la causalité

⁴⁶ Cette idée générale de rendements d'échelle croissants sur des structures toujours plus importantes est aussi défendue par Beckerman (1995a).

unidirectionnelle entre une population plus importante entraînant des entreprises croissant plus rapidement comme assumé par Simon pourrait être renversée. Daly (1995) a aussi identifié des paradoxes et des confusions dans la thèse des abondancistes. Un paradoxe tout d'abord entre une vision microéconomique où il existerait un niveau optimal de production et un niveau macroéconomique où il n'y aurait pas de limite de taille. Il y aurait également une confusion entre développement et croissance chez certains économistes. Il suffirait d'augmenter la croissance pour diminuer la pauvreté. Toutefois, la croissance économique n'est absolument pas une condition suffisante à la progression du bien être de la société. Pour finir et similairement aux conclusions de Swanson (1996), les abondancistes adopteraient une vision délibérément trop simplifiée de la croissance et du progrès technique, ils ignoraient donc les revers néfastes causés par ces derniers sur l'environnement.

6 Conclusion

Nous avons vu au cours de ce chapitre les différents courants ayant façonné la vision de l'épuisement des ressources naturelles par l'homme. Plusieurs typologies ont tenté de rendre compte de la diversité de ces mouvements par leur attribution à différentes catégories aux caractéristiques propres.

Ainsi Tilton (1996, 2003, 2007) a forgé une typologie opposant d'une part les partisans du paradigme du coût d'opportunité et d'autre part les adhérents au paradigme du stock fixe. Les premiers confient aux mécanismes de marché et à la technologie une puissance suffisante pour repousser indéfiniment la rareté amenée par la nature tandis que les seconds entrevoient une fin inévitable à la croissance des biens et services dans un environnement fini. L'analogie de l'orange de Peterson et Fisher (1977) est à ce titre intéressante, dans la mesure où elle représente bien le débat conflictuel opposant les deux groupes. Le paradigme du stock fixe insiste sur le fait que l'orange contient une quantité finie de jus. Les partisans du coût d'opportunité rappellent que ce n'est pas l'orange qui compte mais le pouvoir de presser l'orange (via les mécanismes de marché) pour en tirer le jus. Cela ne signifie pas que la quantité de jus extractible est infinie pour autant. Le supplément de force requise pour tirer toujours un peu plus de jus deviendra vite insoutenable et il est fort probable qu'il restera encore du jus dans l'orange lorsqu'on abandonnera celle-ci.

Giraud (2008) de son côté affirme que la distinction entre progressistes et irréversibilistes tient essentiellement à une affaire de croyance attachée au mécanisme de substitution des ressources naturelles et au progrès technique.

Une autre typologie fondée par Turner (1991) distingue quatre visions radicalement différentes : l'univers naturisciste, l'univers mécanique, l'univers thermodynamique et l'univers du vivant. Ces différents univers ne placent pas l'homme dans la même position (centrale ou secondaire) et prêtent des valeurs plus ou moins fortes aux notions d'équités intra et intergénérationnelles.

Enfin, Daly (1979) adopte un point de vue focalisé sur la pérennité de la croissance. Les théories liées à l'épuisement se rattachent plus ou moins toutes à des volontés d'affirmer ou d'infirmer la possibilité d'une croissance continue de l'homme et de son économie. Il envisage donc trois courants : celui des optimistes favorables à la croissance sans limites, et celui des détracteurs de la croissance qui se scindent en deux groupes considérant des limites à la croissance soit par le spectre des moyens ou des fins. Les premiers émettent des doutes sur la perpétuation des moyens de la croissance matérielle tandis que les seconds s'interrogent sur la désirabilité de la croissance. L'une des méprises de l'économie serait de penser que l'utilité procurée à un individu est seulement fournie par la nature du bien alors qu'en réalité elle est surtout alimentée par le statut du bien⁴⁷. Des enquêtes menées auprès des individus à différentes époques ont montré que les agents économiques ne se perçoivent pas plus heureux aujourd'hui qu'en 1960 (Cohen, 2009) bien qu'ils bénéficient en absolu d'un niveau de vie bien supérieur. La satisfaction d'un individu n'est pas de gagner plus en absolu mais de gagner plus que les autres⁴⁸. Dans une société qui parviendrait largement à satisfaire les besoins primordiaux de ces citoyens et où l'essentiel du combat de la croissance aurait lieu sur le terrain de biens marginaux et luxueux qui n'ont que vocation à distinguer certains individus, il se poserait très clairement le problème de la désirabilité de la croissance. Il y a souvent une confusion importante entre le développement qui est un phénomène qualitatif et la croissance qui est un phénomène quantitatif. Les deux phénomènes ne seraient pas toujours indubitablement associés. Chiffres à l'appui, Pretty (2013) a démontré également que la croissance du PIB par tête est une condition nécessaire à l'augmentation du bien être jusqu'à un certain point (10000 \$ PPA) à partir duquel le PIB par tête est absolument décorrélé de l'évolution du bien être.

⁴⁷ On remarquera que l'économie néoclassique associe l'utilité et le bien être à la valeur monétaire, ce qui revient à associer croissance du PIB et croissance du bien être.

⁴⁸ Cette thèse est identifiée en 1974 sous le nom de paradoxe d'Easterlin.

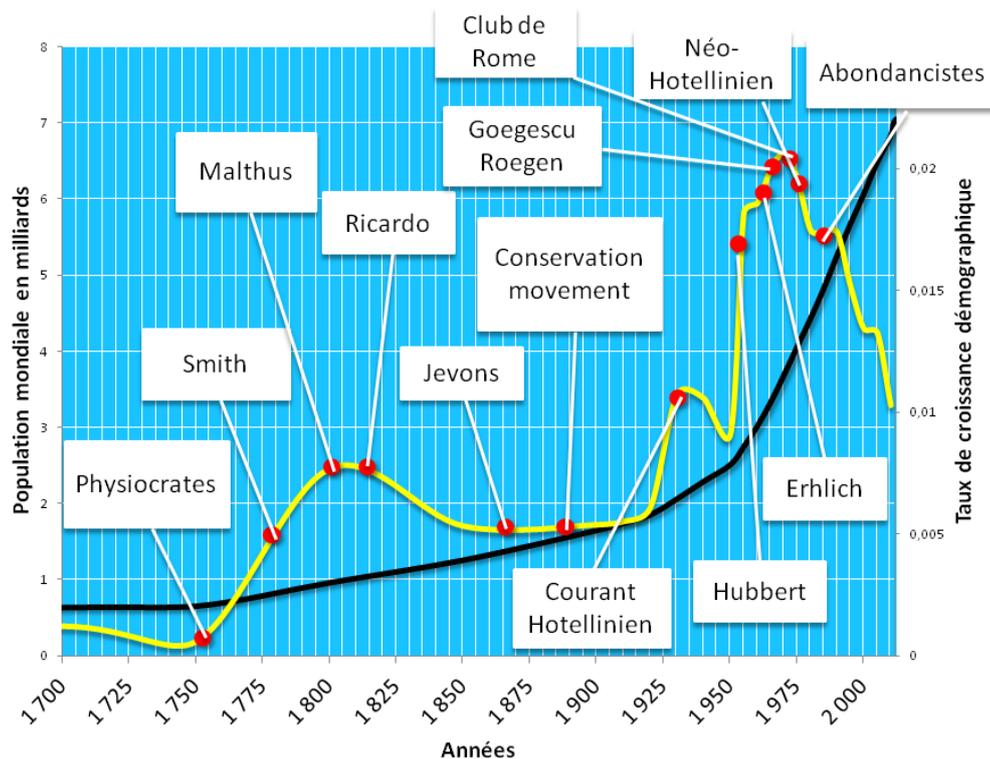


Figure 2-14 Répartition des auteurs et courants liés à l'épuisement en fonction du contexte démographique. Source : auteur

En outre, il apparaît que les théories étudiant l'épuisement des ressources naturelles apparaissent principalement suite à des modifications importantes d'indicateurs conjoncturelles (croissance de la population, prix de l'énergie et des matières premières). L'homme dans la construction de ses théories est influencé par ce qu'il voit et ce qu'il vit. Dans ce contexte, il n'est pas surprenant que les thèses sur la formation des prix des matières premières de Smith et Ricardo s'opposent radicalement. En effet, du temps de Smith la demande en charbon stagne et la disponibilité de nombreuses mines maintient les prix à la baisse tandis que l'époque de Ricardo connaît un véritable boom économique de la demande en charbon (Robinson, 1989). Cette même croissance de la demande en charbon alimente aussi cinquante plus tard les inquiétudes de Jevons et le pousse à rédiger « *The Coal Question* ». Environ cent ans plus tard, le pétrole, une énergie que Jevons n'avait pas su anticiper, supprime le charbon comme première source d'énergie mondiale. Hubbert perçoit au travers des données empiriques pétrolières des limites inhérentes à cette énergie et anticipe sa substitution massive par l'énergie nucléaire (fission et fusion)...une possibilité qui ne se concrétisa pas. C'est sans surprise également que les époques de Malthus et Ehrlich rencontrent des accélérations démographiques alors sans précédent les conduisant à décréter l'épuisement des ressources naturelles comme un phénomène avant tout démographique (Figure 2-14). Aujourd'hui, la croissance mondiale suite à la transition démographique a

ralenti considérablement et la population d'après l'ONU devrait se stabiliser aux environs de 2100 réduisant le poids de cette variable dans l'équation de l'épuisement des ressources naturelles. De façon identique, un nombre important de modèle néo-hotellinien⁴⁹, même s'ils soutiennent une approche très rigoureuse par hypothèses, fournissent des conclusions très proches d'une approche par induction à partir des faits (Figure 2-16). Enfin, la « crise » des terres rares résultant de la très forte réduction des quotas d'exportation appliqués par la Chine en 2010 est visible à la fois dans l'information recherchée sur internet, dans les prix, mais également dans les publications scientifiques (voir Figure 2-15).

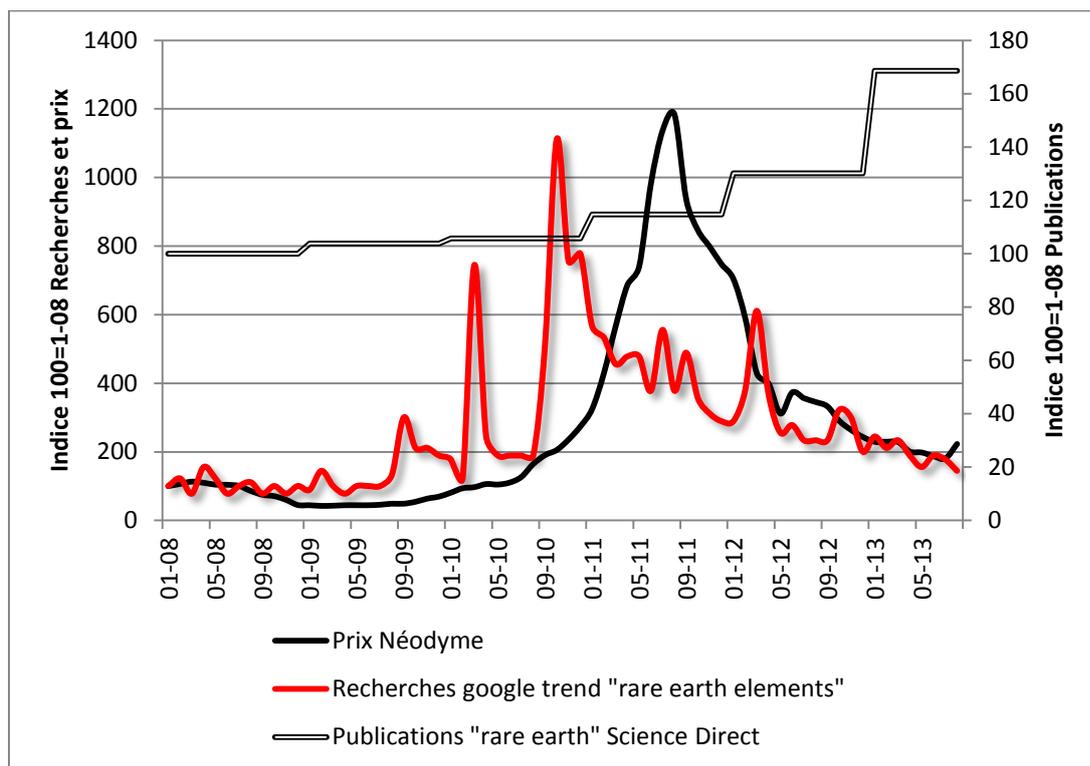


Figure 2-15 Evolution des recherches, des prix, et des publications liées aux terres rares suite à la crise chinoise. Source : calculs de l'auteur

Cet ensemble d'exemples souligne la possibilité de théories de l'épuisement biaisées consciemment ou inconsciemment en faveur de la réalité conjoncturelle. Ce constat explique aussi pourquoi la science économique semble avoir délaissée la question de l'épuisement des ressources naturelles depuis le début des années 90. A cet effet, nous pouvons remarquer que la vague la plus récente de littérature économique sur l'épuisement d'une ressource naturelle date des années 70-80. Ce bilan est conforté par Fisher et Ward (1999) qui observent un trend à la baisse dans l'intérêt porté aux ressources non renouvelables sur la période 1974-1997

⁴⁹ Notamment les modèles débouchant sur des évolutions du prix en U très proches de la trajectoire des prix durant les années 70-80.

dans la revue *Journal of Environmental Economics and Management*. Cette décroissance de la part relative offerte aux ressources épuisables s'opère au profit d'autres sujets comme les ressources renouvelables mais surtout de la question du développement durable et du changement climatique. Cette décroissance a probablement été plus forte encore au début des années 2000. Similairement, Fagnart et Germain (2012) remarquent que parmi la plupart des grands manuels d'économie consacrés à la croissance, aucun ne fait référence à la problématique de l'épuisement des ressources naturelles ou d'une manière si succincte que l'essentiel du propos est vidé de sa substance.

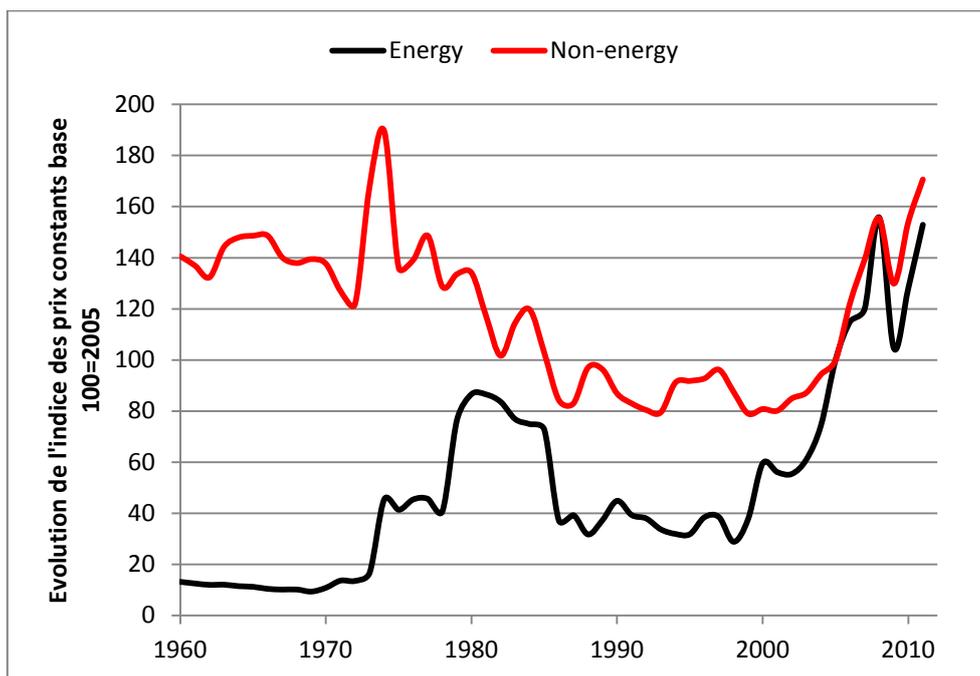


Figure 2-16 Evolution des indices de prix constants de différentes ressources naturelles. Source : données de la Banque Mondiale et calculs de l'auteur

Au final, la disponibilité de long terme⁵⁰ des ressources naturelles loin d'être uni-causale résulte de l'action conjuguée de plusieurs forces (Figure 2-17). Neumayer (2000) estime que le fossé entre pessimistes et optimistes peut s'expliquer essentiellement par leurs positions sur quatre facteurs :

- L'effet prix impactant le recyclage, l'exploration et l'extraction.
- L'effet substitution via le capital au niveau de l'offre.
- L'effet du progrès technique.

⁵⁰ Nous excluons ici, l'ensemble des facteurs de court terme qui pourrait influencer la disponibilité des matières premières. A savoir : la spéculation, les grèves, les phénomènes climatiques, les guerres, les périodes de boom ou de dépression, les effets de pouvoir de marché, les politiques étatiques stratégiques... Se référer en particulier à Landsberg et Tilton (1982) et Rosenau-Tornow et al (2011) pour en savoir plus sur ces points.

- L'effet substitution au niveau de la demande.

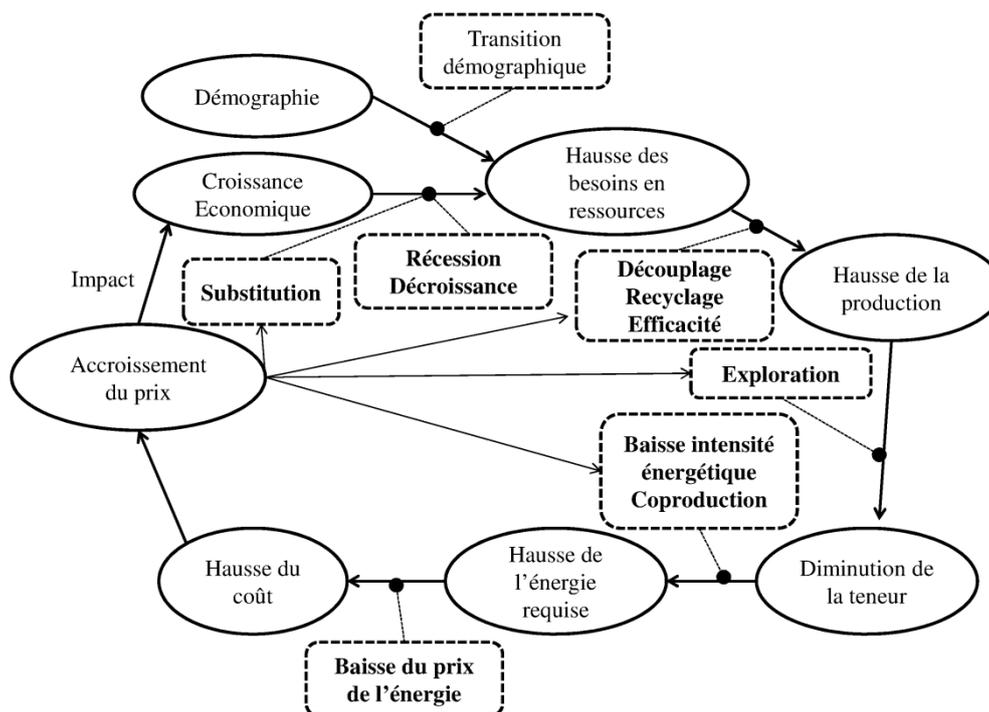


Figure 2-17 Cycle de l'épuisement d'une ressource non renouvelable et ses facteurs atténuants. Source : auteur

Pour des raisons physiques et économiques, le recyclage ou la réutilisation par exemple ne font que retarder l'épuisement et n'autorisent pas une économie circulaire autonome (voir Grosse, 2011 ; Pearce et Turner, 1990) dans une économie de croissance⁵¹. De même la dématérialisation⁵² de l'économie déplace l'usage de ressources et d'énergie vers d'autres secteurs (Ayres, 2001). L'exploration se caractérise souvent par une phase à rendements croissants puis décroissants. En outre, cette activité a aussi des limites physiques puisque le nombre de gisements d'une forme donnée de ressources est un chiffre fini. Nous pouvons toujours basculer vers des ressources non conventionnelles (énergétiques et minières) ou vers des nouvelles régions (arctique, antarctique, régions sous-marines) pour subvenir aux besoins croissants de la demande mais ce type de ressources reste souvent accessible à des coûts supérieurs et au détriment de milieux à faible résilience.

La substitution complète et totale des ressources naturelles par du capital semble largement irréaliste et viole les deux premières lois de la thermodynamique. Impossible de créer un objet ou un service à partir de rien (ni matière ni énergie). De même, la progression du capital

⁵¹ Des précisions sont apportées sur le recyclage via l'annexe 2.2.

⁵² Labys et Waddel (1989) considèrent à ce titre qu'il est plus approprié de parler de «transmatérialisation» plutôt que de dématérialisation. La baisse de l'intensité d'utilisation de certaines ressources s'explique alors par leur remplacement par d'autres catégories de ressources.

(physique ou humain) et du facteur travail est strictement impossible sans consommation supplémentaire de ressources naturelles.

Le progrès technique est souvent cité comme l'une des voies possibles pour échapper à la rareté des ressources naturelles et d'autres fois comme un facteur aggravant, un catalyseur accélérant l'épuisement des ressources naturelles et la dégradation de l'environnement. Le progrès technique opère de trois façons différentes sur la sphère des matières premières :

- Il crée des substituts ou des alternatives à la consommation primaire de ressources naturelles via le progrès technique de substitution. À ce titre, il faut remarquer que certaines possibilités de substitutions naturelles peuvent exister sans progrès technique. Son effet tend à repousser les conséquences de l'épuisement sur la croissance. Néanmoins, il existe une limite à long terme ou très long terme à ce type de progrès technique⁵³.
- Il diminue la consommation de ressources naturelles pour un même service rendu que ce soit du côté de l'offre ou de la demande via un progrès technique d'efficacité. Cependant, les rendements attendus de ce type de progrès technique ont des limites imposées par la physique. De plus, son effet total sur l'épuisement des ressources est incertain compte tenu de l'existence d'un effet rebond de la demande et d'une possibilité d'un progrès technique biaisé en faveur de l'extraction du côté offre.
- Il accélère l'épuisement en proposant de nouveaux produits et de nouveaux usages via un progrès technique additif. Ce progrès technique additif est sans limite et tend à s'accélérer.

L'effet substitution d'une ressource naturelle épuisable au niveau de l'offre ou de la demande peut intervenir de trois manières différentes : (1) Suite à la hausse du prix d'une ressource épuisable et/ou au tarissement des quantités disponibles, une industrie ou une économie a la possibilité de la substituer par une autre ressource épuisable. Le nombre d'éléments naturels sur le tableau de Mendeleïev étant par nature fini, le nombre de substitution progressive l'est aussi. (2) Une autre possibilité consiste à remplacer la ressource en épuisement par une ressource renouvelable fournissant des caractéristiques techniques et chimiques similaires. Cette voie est probablement le cheminement le plus logique de nos économies à plus ou moins long terme. Cependant, le lecteur comprendra que cette voie ne permet pas non plus

⁵³ Le nombre de substitut étant par nature un nombre fini, les possibilités de substitutions s'amointrissent au fur et à mesure que l'on épuise les substituts possibles à une ressource. A moins de substituer une ressource épuisable par un substitut renouvelable (règle de Daly) ou par une *backstop technology*.

une croissance infinie mais au mieux un état stationnaire, puisque la croissance des ressources renouvelables (matérielles) connaît une limite imposée par l'espace disponible et le rendement énergétique théorique maximum de la photosynthèse. (3) Pour finir, l'Homme a l'espoir de s'engager sur un dernier chemin en investissant dans le développement de « backstop technology⁵⁴ », terme introduit par Nordhaus (1973). Depuis 1970, plusieurs solutions technologiques furent pressenties comme des « backstop technology ». Tout d'abord, il faut préciser qu'il n'existe pas, pour l'instant, de backstop technology pour les ressources non énergétiques. En ce qui concerne les ressources énergétiques, les solutions paraissent plus nombreuses. Le nucléaire a proposé une partie des « solutions », à savoir les réacteurs à neutrons rapides et les différentes formes de fusion (magnétique, inertielle). Les réacteurs à neutrons rapides ne sont pas réellement une backstop technology car ils ne font que multiplier par à peu près 100 les ressources en uranium⁵⁵. Les fusions magnétiques et inertielles restent possibles, bien que les réacteurs expérimentaux construits jusqu'à maintenant n'aient pas réussi, ni à maintenir cette réaction plus de quelques minutes, ni à en tirer un bilan énergétique positif. De plus, cette technologie ne nous permet pas non plus de nous passer de ressources naturelles, car le tritium, un des deux éléments de la réaction, nécessite du lithium pour être produit. Enfin, la maturité industrielle de cette technologie a l'inconvénient de reculer au fur et à mesure que le temps défile, de la même manière que l'horizon recule lorsque l'on se dirige dans sa direction⁵⁶. L'autre alternative composée par les énergies renouvelables, semblent apparaître comme l'option de dernier ressort bien qu'il faille déterminer au préalable si leurs déploiements à grande échelle n'aillent pas buter sur une contrainte liée aux ressources naturelles nécessaires à leurs productions (Kleijn et Van der Voet, 2010 ; Kleijn et al., 2011 ; Fizaine, 2013).

Sur la question de l'épuisement de ces métaux, il subsiste la problématique liée au choix de l'indicateur signalant correctement l'épuisement d'une ressource. En effet, il n'existe pas aujourd'hui de consensus sur l'indicateur apte à manifester sans ambiguïté l'épuisement économique d'une ressource naturelle. Ce qui nous amène à un troisième chapitre consacré à la littérature d'indicateurs foisonnante établie sur l'épuisement d'une ressource naturelle.

⁵⁴ Ce terme désigne ici, une technologie pouvant créer une ressource énergétique ou matérielle de manière illimitée à coût constant.

⁵⁵ La technologie des neutrons rapides repose sur l'exploitation de l'isotope 238 de l'uranium constituant l'essentiel des ressources en uranium. Cet isotope est très peu valorisé par les réacteurs actuels à neutrons lents.

⁵⁶ Certains ouvrages dédiés à cette question prédisaient dans les années 70 une exploitation industrielle de la fusion dans les années 2010. Aujourd'hui, si l'expérience ITER remplit ses objectifs, des réacteurs industriels pourraient apparaître après 2050.

CHAPITRE 3 : LE PRIX ET LES AUTRES INDICATEURS DE RARETE ET DE L'ÉPUISEMENT D'UNE RESSOURCE NATURELLE

« The 'finite resources' argument is flawed in every respect. It is based on a concept of resources that is static and unimaginative, and an underestimate of the human capacity to make technological progress and adapt to changing conditions ».

Beckerman, *Small is Stupid, Blowing the Whistle on the Greens*, 1995.

« The future is something inherently uncertain and it is humans' curse (or relief if you like) not to know with certainty what the future will bring. The past can be a bad guide into the future when circumstances are changing. That the alarmists have regularly and mistakenly cried 'wolf!' does not a priori imply that wood are safe ».

Neumayer, *Scarce or abundant? The Economics of natural resource availability*, 2000.

1 Introduction

La question de la définition et de la construction d'un indicateur approprié à la rareté d'une ressource naturelle fait aujourd'hui encore débat. Au préalable et avant toute discussion autour de certains indicateurs, il convient de définir ce que l'on entend par rareté. C'est l'objet de cette introduction.

Le mot rareté revêt différents sens selon la discipline d'approche. Un économiste s'intéressera à la rareté relative d'une ressource, c'est-à-dire à son degré d'abondance rapporté aux besoins exprimés pour cette ressource. Le géologue se focalisera sur la rareté physique d'une ressource.

Notons tout d'abord que les deux formes de rareté sont liées mais qu'il existe une corrélation imparfaite entre ces deux notions. Ainsi, une ressource peut être assez commune dans la croûte terrestre au sens géologique du terme et être perçue comme rare au niveau économique car elle nécessite l'usage de grandes quantités d'autres ressources rares (travail, capital, énergie, ressources naturelles) pour être extraite. La réciproque est aussi possible avec

l'évolution du progrès technique, une ressource naturelle peut devenir abondante économiquement sans que son degré d'abondance physique soit nécessairement modifié.

Les facteurs géologiques et physico-chimiques des métaux forment en partie leur valeur économique via une partie de la détermination des coûts miniers. Ces coûts peuvent s'expliquer par trois facteurs avancés par Brooks (1965) :

- La rareté géologique, c'est-à-dire son abondance moyenne dans la croûte terrestre.
- La faculté de l'élément à se concentrer dans des gisements à des taux de concentration supérieurs à son abondance moyenne dans la croûte terrestre.
- Le type de minerais avec lequel il s'associe. Certains types de minerais plus réfractaires, demandent plus d'énergie ou de traitement pour en extraire le métal désiré (aluminium). D'une autre manière, certains minerais associent plusieurs métaux dont certains sont considérés comme des impuretés à retirer, ce qui élève les coûts de raffinage.

L'indicateur de rareté d'une ressource se matérialise par le prix : il devient le signal qui, sous certaines conditions, transmet aux agents une information sur la rareté d'une ressource. Une mesure correcte pour apprécier la rareté d'une ressource naturelle a alors été posée par Fisher (1979, p.252) :

"A measure of a resource's scarcity should have just one essential property: it should summarize the sacrifices, direct and indirect, made to obtain a unit of the resource".

Pour Mackellar et Vining (1989), la rareté économique provient d'un coût d'opportunité élevé en termes de consommation d'autres biens et services abandonnés.

Les débats sont également présents autour des indicateurs de rareté. La construction d'indicateurs est une démarche empirique dont les motivations ne sont pas systématiquement fondées sur la théorie économique liée à l'étude des ressources épuisables. Comme Noorgard (1990) ou Giraud et Nappi (1994) le précisent, la littérature théorique déduit les chemins de prix et de production des ressources épuisables sous différentes hypothèses alors que la littérature empirique tente de déduire, à partir des chemins pris par les indicateurs économiques, si les ressources deviennent rares ou non. Ces préoccupations de rareté empirique avérée d'une ressource naturelle sont anciennes puisque les travaux de Jevons (1865) relèvent de ce type d'évaluation empirique. La littérature empirique sur la rareté des ressources a également été fortement investie par les entreprises, les gouvernements et plus

généralement par la sphère politique. L'objectif premier étant de pouvoir tirer des indicateurs de la rareté des considérations d'ordre stratégique, économique et sociale. Parmi celles-ci, trois questions seront analysées principalement : (1) la variation du niveau de l'indicateur reflète-t-elle une variation de la disponibilité de la ressource ? (2) L'évolution de l'indicateur nous fournit-elle des informations sur la disponibilité future de la ressource et sur son horizon d'épuisement ? (3) L'indicateur nous permet-il d'effectuer des comparaisons de la rareté relative entre différentes ressources ?

Quelles sont les propriétés que doivent revêtir ces indicateurs ? D'après Ozdemiroglu (1993), un indicateur remplissant correctement son rôle d'avertisseur de la rareté nécessite le respect de trois conditions préalables :

- Il doit refléter la rareté passée de la ressource mais surtout l'évolution de la rareté future et, par conséquent, être un indicateur anticipé de la rareté.
- Il doit être comparable afin de permettre des évaluations du niveau de rareté de plusieurs ressources substituables.
- Il doit être calculable, c'est-à-dire qu'il doit bénéficier à la fois d'une collecte de données et d'une méthode de calcul simple et fiable.

Il existe cependant des circonstances où le changement de rareté d'une ressource ne sera pas détecté par les indicateurs économiques notamment :

- En l'absence de marché organisé, les données disponibles sur les prix, les rentes et les coûts sont alors inaccessibles.
- Quand les ressources sont en accès libre.
- Quand il n'existe pas de marchés *futures*, les utilisateurs agissent alors comme des individus averse au risque consommant davantage de ressources. Cela tire les prix à la hausse, donc exagère la rareté de la ressource (Stiglitz, 1979).
- Lorsque la production de la ressource génère des externalités positives ou négatives.

Il existe une multitude d'indicateurs, économiques ou non, centrés sur la rareté des ressources naturelles épuisables. Nous les analyserons tour à tour en précisant leurs avantages et leurs limites. Nous les avons pour cela triés en trois catégories distinctes : les indicateurs géologiques de la rareté (qui fondent une partie de la rareté économique des ressources), les indicateurs économiques de la rareté (adoptés dans la plupart des approches empiriques

standards), et les indicateurs physiques et environnementaux de la rareté (qui visent à combler les lacunes des indicateurs économiques en fournissant une vision plus globale).

2 Les indicateurs géologiques de la rareté

Les indicateurs géologiques de la rareté demeurent les indicateurs les plus connus et les plus utilisés par la presse et le grand public pour faire état de la disponibilité d'une ressource naturelle. Cela s'explique par la disponibilité des données et la simplicité de mise en œuvre de ces indicateurs. Pour autant, plusieurs limites méthodologiques sont soulevées à leurs propos.

Premièrement, leur utilisation peut être faite sans qu'une bonne compréhension des hypothèses sous-jacentes soit respectée ce qui conduit à des interprétations ou à des conclusions hasardeuses : par exemple, Tilton et Lagos (2006) ont ainsi considéré que la notion de *base resources* - utilisée dans les calculs de disponibilité physique de certains métaux comme le cuivre - englobe celle de ressources alors qu'en réalité, ce sont des notions similaires comme l'ont expliqué Gordon et al (2007) et Arnim Von Gleich (2006).

Deuxièmement, la multitude d'indicateurs disponibles - le monde des ressources naturelles compte plus d'une vingtaine de mesures – crée une certaine difficulté à distinguer les différences entre chaque indicateur, qui seront, de ce fait, souvent considérés comme similaires⁵⁷.

Enfin, s'il existe des tentatives concertées de fusion de ces mesures⁵⁸ dans l'objectif de gagner en cohérence et en lisibilité, comme le note Rotillon (2005), il existe encore une prépondérance à présenter plusieurs résultats.

Pour comprendre les enseignements produits par ces indicateurs géologiques et la manière dont ils peuvent s'inscrire dans l'évaluation de la rareté économique, nous procéderons comme suit : nous présenterons la méthodologie pour calculer ces indicateurs. Puis nous fournirons des applications empiriques de ces derniers et relèverons les conclusions que nous pourrions en tirer tout en tenant compte des limites évoquées par la littérature académique.

⁵⁷ Une partie de ces définitions sont fournies en annexes 3.1.

⁵⁸ La codification JORC australienne va dans ce sens bien qu'elle soit encore loin d'être adoptée dans l'ensemble des pays et entreprises minières.

2.1 Les ressources en place

Concernant les indicateurs géologiques, la première distinction à retenir repose sur la distinction de réserves et ressources. Cette séparation apparaît pour la première fois dans l'article de McKelvey (1972), qui instaure l'une des premières classifications (Tableau 3-2). Selon lui, les réserves intègrent la notion de certitude géologique et de rentabilité économique.

Selon la Commission économique de l'ONU pour l'Europe (2007, p.2), on entend par ressource : « la totalité des quantités de pétrole, gaz naturel, charbon ou autre minéral présent dans le sol. Ces ressources ne sont pas nécessairement recouvrables (...) » et « (...) d'un autre côté, les réserves désignent la part techniquement et économiquement recouvrable des ressources recouvrables ».

L'un des calculs les plus utilisés pour estimer les ressources en place consiste à multiplier l'abondance moyenne d'un élément dans la croûte terrestre par le volume de la croûte terrestre existant entre la surface terrestre et une profondeur variant de 1 à 10 km selon les études (Trainer, 1982). Ainsi, contrairement aux réserves, la notion de ressources en place n'évolue pas. Elle peut donc être appréhendée comme la limite maximale de disponibilité des ressources naturelles épuisables terrestres.

Cette limite est fixe mais les quantités de ressources sont tout bonnement colossales. Les ressources en place de cuivre sur le premier kilomètre de la croûte terrestre atteignent, d'après Bihouix (2013), 20 000 milliards de tonnes, voire d'après Tilton (2003)⁵⁹, 1,5 millions de milliards de tonnes pour l'ensemble de la croûte terrestre, des valeurs à comparer aux 680 millions de tonnes de réserves.

Ce genre d'estimation conduit les abondancistes à repousser les limites d'épuisement d'une ressource minérale puisqu'il peut y avoir plusieurs centaines de milliers d'années de production (sous l'hypothèse d'une production constante et en divisant les ressources par la production). Toutefois, il y a plusieurs limites à l'évaluation de ce type d'indicateur.

Tout d'abord, la croissance exponentielle de la production transforme des centaines de milliers d'années de consommation en quelques centaines d'années de consommation. Ensuite, il faut distinguer l'épuisement géologique - incarné ici par les ressources en place - de l'épuisement économique (Brobst, 1979). En effet, l'épuisement économique d'une

⁵⁹ Des géologues à partir de modèle de diffusion tectonique des plaques ont estimé les ressources en place de cuivre à environ 390 000 Gt de cuivre (Kesler et Wilkinson, 2008).

ressource surviendra avant son épuisement géologique parce le coût, en terme de facteur de production, sera tel qu'il n'existera pas, à ce niveau de prix, de demande positive pour la ressource. Il est donc probable que seule une partie des ressources en place sera potentiellement recouvrable. Un ensemble de contraintes empêchera sans doute la récupération de la totalité de ces ressources (Trainer, 1983 ; 1999) :

- A partir d'un certain niveau de découverte, l'exploration éprouvera une difficulté croissante à trouver des nouveaux gisements.
- Une partie des ressources en place ne possédera jamais une concentration géologique suffisante pour être exploitée économiquement. Par ailleurs, le coût énergétique à consacrer à cette exploitation risque de devenir exorbitant sachant qu'il progresse de façon inverse avec le niveau de concentration d'un gisement (Norgate et Jahanshahi, 2010).
- L'exploitation de la totalité des ressources en place butera sur des conflits d'usage du sol (villes, zones protégées) ou des zones inaccessibles (océans, zones polaires).
- La profondeur (température⁶⁰) et les failles empêcheront probablement toute récupération de ressources trop éloignées de la surface.

Steen (2006) et Steen et Borg (2002) fournissent une estimation du coût de récupération moyen de plusieurs métaux lorsqu'on les extrait d'un minerai détenant une concentration équivalente à l'abondance moyenne des métaux dans la croûte terrestre (Tableau 3-1).

Métal	Coût (abondance croûte terrestre)	Prix actuel	Rapport	Prix réel 1900/2010
Cadmium	68000	3	22667	260
Cobalt	260	30	9	3,20
Cuivre	160	6	27	1,22
Nickel	250	16	16	1,32
Plomb	390	1,8	217	1,1
Etain	1100	16	69	0,82
Tungstène	4800	20	240	0,54

Tableau 3-1 Coût d'extraction au niveau de concentration de la croûte terrestre et prix actuel (€/kg) des métaux. Source : Steen (2006), *calculs de l'auteur*

⁶⁰ Le gradient thermique de la terre est d'environ 30°C supplémentaires tous les kilomètres. La mine la plus profonde actuellement atteint 3,9km de profondeur mais l'exploration n'est, pour l'instant, possible que pour des profondeurs inférieures à 1 km.

On constate alors que l'exploitation des minerais de métaux à une concentration équivalente à celle de la croûte terrestre requérait une multiplication de leur prix par un facteur 10 à 240. En comparaison, le progrès technique n'a réussi à faire baisser les prix que d'un facteur 3 à 1,1 voire n'a pas su contenir une évolution du prix à la hausse (étain et tungstène). Il est donc improbable que nous extrayons dans l'avenir par exemple jusqu'à la dernière tonne d'étain de la croûte terrestre du fait de contraintes liées aux coûts économiques d'exploitation des gisements les plus pauvres. Comme les ressources en place n'ont pas vocation à pouvoir nous indiquer la disponibilité future d'une ressource naturelle, nous nous penchons donc sur un autre indicateur prenant en compte la notion de coût d'exploitation et de rentabilité économique.

2.2 Les réserves

Contrairement aux ressources, le concept de réserves est plus étroit et nécessite davantage de conditions.

Ainsi, L'*United States Geological Survey* (USGS) définit les réserves par : « *That part of the reserve base which could be economically extracted or produced at the time of determination.* »

La définition fournie par Tilton (2003, p. 19), introduit la notion de certitude géologique et parvient à mieux considérer, selon nous, le concept de rareté : « *Reserves are the quantities of a mineral commodity found in subsurface resources (field deposits) that are both known and profitable to exploit with existing technology and price.* »

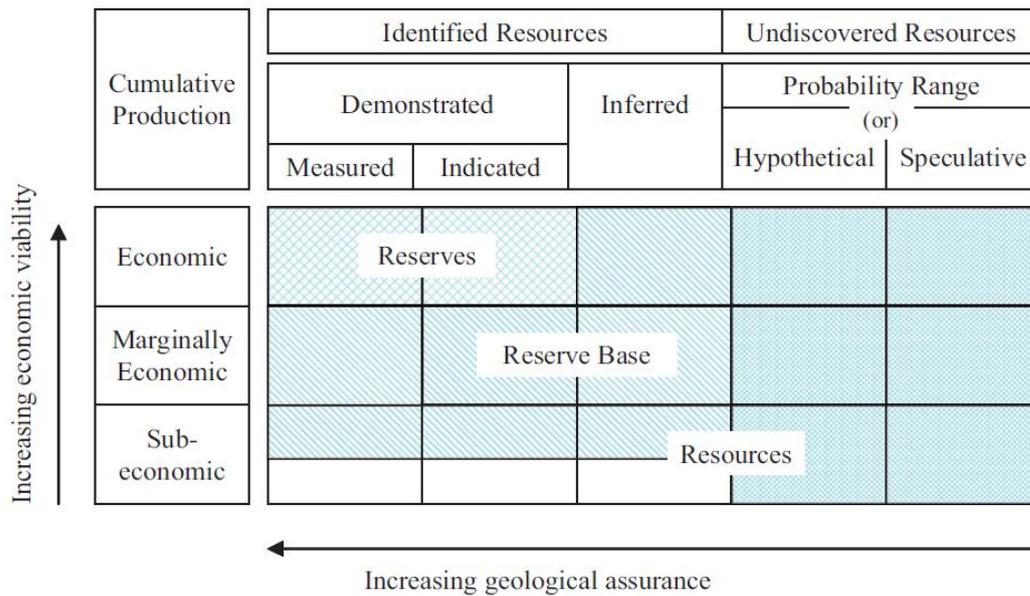


Tableau 3-2 Diagramme de McKelvey (1972) modifié par Gordon et al. (2007)

Comme l'illustre le Tableau 3-2, les réserves telles que définies par McKelvey (1972), vont varier en fonction de la certitude géologique et de la rentabilité économique des gisements. Les réserves évoluent par conséquent en fonction de la connaissance géologique des gisements donc au grès des nouvelles découvertes ainsi qu'en fonction de la rentabilité des gisements qui elles mêmes dépendent du niveau de progrès technique et de prix de la ressource. Par ailleurs, les niveaux de certitudes attachés à la rentabilité économique et à la connaissance géologique des gisements vont aussi permettre de délimiter et définir des classes plus précises, plus étroites ou plus larges que le concept de réserves (voir annexes 3.1).

Cette définition souligne à la fois la relation multifactorielle et la nature interdisciplinaire des réserves qui est un terme physico-technico-économique pour reprendre les mots de Rotillon (2005)⁶¹.

Quels indicateurs sont alors produits à partir de ces définitions ? Il est immédiat que ces définitions traduisent une mesure de la quantité de réserves. Elle dépend d'après Arnim Von Gleich (2006) : (a) de la connaissance des gisements, leur type (formes de minerais), leur distribution, leur taille et leur concentration, mais aussi (b) de l'efficacité et l'efficacités des techniques d'extraction (taux de récupération, efficacité matérielle et énergétique...), et enfin

⁶¹ Les différentes mesures de réserves font varier la certitude géologique, le progrès technique, et le prix de marché, pour en savoir plus se référer aux annexes.

(c) des coûts d'opération et des profits (niveau des salaires, coûts en énergie, normes de sécurité, normes environnementales, taux de change, taux d'intérêt, politique fiscale).

Les réserves ne sont donc en aucun cas une limite statique mais bien un indicateur dynamique. Les réserves peuvent être étendues par les nouvelles découvertes, le progrès technique (amélioration du taux de récupération et des techniques d'extraction) et par une hausse du prix de marché de la ressource (Fisher, 1977 ; Tilton, 2003 ; Rotillon, 2005). On trouve ici une limite à l'interprétation des réserves comme un indicateur de pénurie ou de rareté d'une ressource, et des auteurs ont fait le choix de s'intéresser davantage aux coûts d'exploration et au budget d'exploration des compagnies relativement à leur production minière totale (Rosenau-Tornow et al, 2011).

A contrario, même si le progrès technique suffit à abaisser le coût d'exploration et le coût de découverte d'une ressource, rien n'assure que les réserves augmenteraient pour autant. En effet, les réserves des producteurs résultent d'un procédé d'optimisation (Mackellar et Vining, 1989), et aucun d'entre eux n'a intérêt à investir de sorte à détenir des centaines d'années de réserves. L'exploration et la découverte possède un coût direct et un coût indirect, c'est le coût d'opportunité (Cairn, 1990). Investir dans la découverte de réserves dont le producteur aurait l'utilité dans cinquante ans, c'est stériliser le rendement de cette même somme investie dans un actif alternatif.

La détermination du montant des réserves obéit aussi à des intérêts politiques et stratégiques, au niveau des Etats et des entreprises. Dans les années 1980, les producteurs de l'OPEP avaient ainsi intérêt à surestimer leurs réserves car ces dernières définissaient les quotas de production du cartel et donc leurs profits. Gordon et al (2007) estiment également que les hypothèses de prix et de certitudes géologiques, rentrant dans le calcul des réserves, sont la plupart du temps opaques. Enfin, les moyens financiers, institutionnels et humains visant à prouver des réserves ne sont pas toujours disponibles notamment dans un nombre important de pays en développement. Les données et les évaluations sur les réserves sont alors manquantes ou rarement révisées (Mackellar et Vining, 1989).

L'indicateur de réserves ne peut donc pas être utilisé pour anticiper la disponibilité économique ou physique future, tout comme nous ne pouvons pas déduire directement de ses variations des conclusions sur l'évolution de la disponibilité économique ou physique de la ressource.

2.3 Le ratio production sur réserves (R/P)

L'indicateur découlant des réserves, et souvent repris dans la presse, consiste à diviser la quantité de réserves d'une ressource par sa production annuelle (R/P). Cet indicateur a montré, pour la plupart des ressources, une évolution stable dans le temps (Watkins, 2006 ; Neumayer, 2000) comme illustrée par les Figure 3-1 et Figure 3-2. Par exemple, d'après les données du *BP Statistical Review* (2012), le R/P du pétrole a évolué dans une fourchette de valeurs comprises entre 30 et 54 alors même que le prix de cette ressource décrivait des fluctuations décorréliées de cet indicateur. Sur le plan économique, une étude de Toth et Farkas (2011) a également montré une évolution non corrélée du prix avec le R/P pour quatre métaux sur cent ans. Ce résultat semble indiquer que les agents économiques ne perçoivent pas le R/P comme un indicateur probant de la rareté d'une ressource naturelle car ses variations ne sont pas retranscrites dans la valeur de négociation de la ressource (son prix).

La Figure 3-2 illustre la tendance du R/P liée au cuivre sur l'ensemble du XX^{ème} siècle. Le trend de l'indicateur est relativement stable sur la totalité du siècle hormis deux pics causés par des chutes soudaines de la production en 1921 et 1932.

Une variante du R/P consiste à calculer un R/P exponentiel tenant compte de l'évolution de la production (Neumayer, 2000 ; Varet, 2012) sous l'hypothèse que la production va continuer à progresser à la même vitesse annuelle que par le passé. Cet indicateur présente les mêmes tendances (mais à des niveaux plus faibles) que l'indicateur R/P classique et cela pour plusieurs types de ressources naturelles (Figure 3-3). Là encore, bien qu'il tienne compte de la dynamique de l'offre, cet indicateur n'intègre pas d'autres caractéristiques de l'évolution de l'offre (la hausse des réserves par l'exploration et l'accroissement mécanique de ces dernières par le prix).

Ces caractéristiques, comme l'accroissement mécanique des réserves par le prix et l'exploration, peuvent affecter la course des R/P et R/P exponentiel dans le temps comme le montre les évolutions opposées de l'indicateur R/P du cuivre et du fer entre 1995 et 2011. Ces tendances opposées (l'un chute, l'autre progresse) s'expliquent par une hausse plus forte de la composante réserves du R/P du cuivre en comparaison de celle du fer.

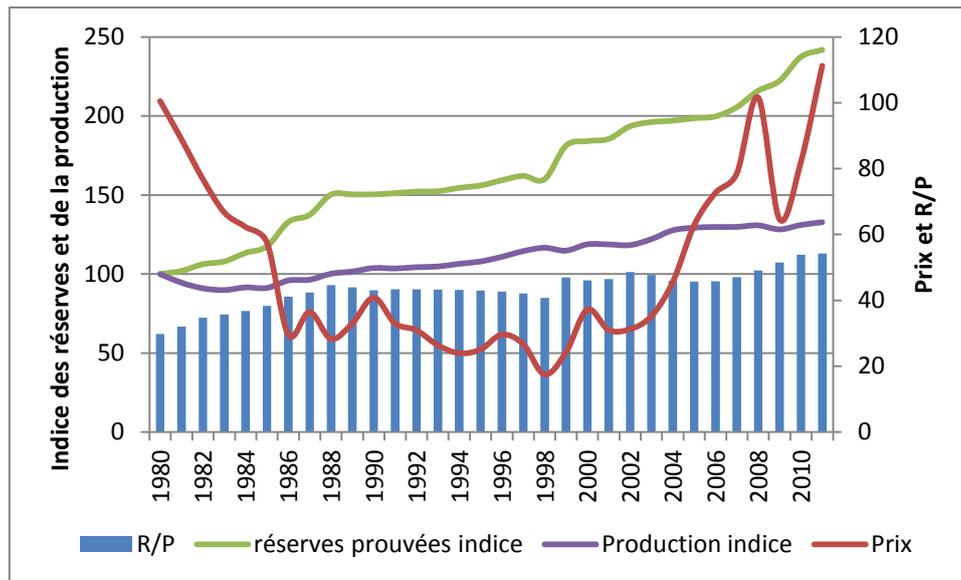


Figure 3-1 Evolution en indice de la production et des réserves de pétrole, du prix et du R/P. Source : BP Statistical Review (2012), calculs de l'auteur

Au final, le R/P peut nous fournir une idée de la relation entre l'évolution de la production et l'évolution des réserves. Il traduit donc la décision d'investir dans l'activité d'exploration pour renouveler le stock de réserves et ainsi faire face aux hausses de la production. Il ne doit pas, en revanche, être pris pour un indicateur anticipé de la disponibilité physique ou économique d'une ressource car son calcul n'intègre pas les évolutions possibles des facteurs l'affectant (la production, mais surtout l'évolution des réserves). Il ne donne pas non plus d'idée sur l'horizon d'épuisement économique de la ressource. D'autres études ont, par conséquent, cherché à déterminer si l'évolution des réserves via les découvertes pouvait être anticipée.

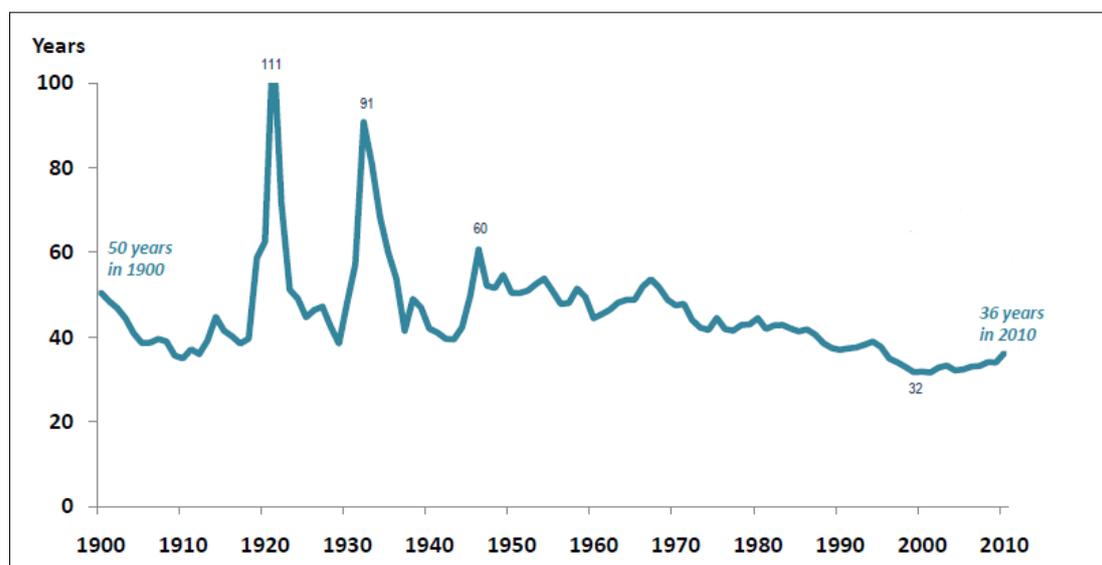


Figure 3-2 Evolution du R/P pour le cuivre de 1900 à 2010. Source : Schodde (2010, p.12)

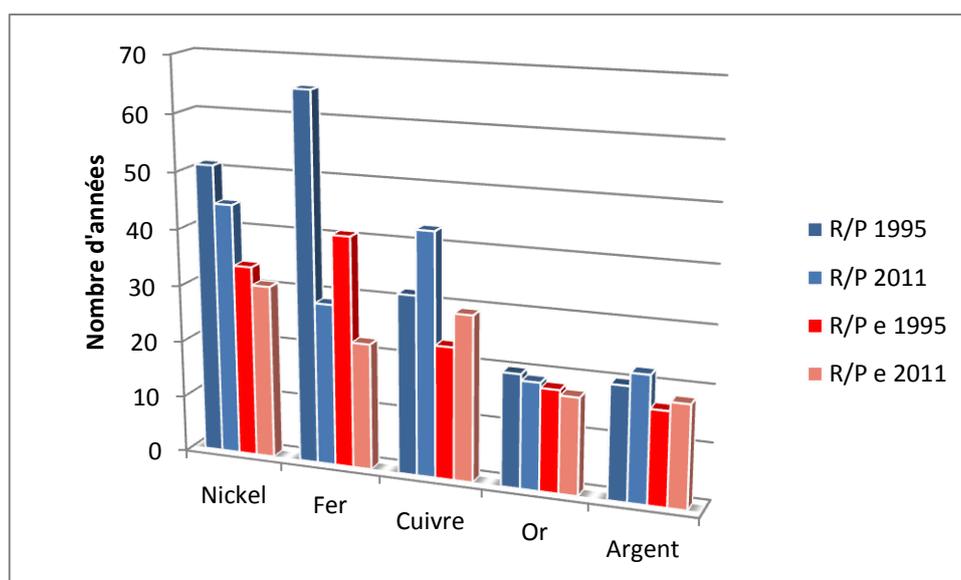


Figure 3-3 Evolution du R/P classique et exponentiel pour différentes ressources. Source : USGS (2012), *calculs de l'auteur*

2.4 L'évolution des découvertes

Compte tenu de l'importance de l'évolution des découvertes dans la détermination des réserves, certaines études ont essayé de discerner un schéma d'évolution des quantités de ressources découvertes. Cependant, ces études se heurtent souvent à plusieurs obstacles principaux inhérents au concept de réserves : (1) l'évolution des quantités découvertes n'est pas indépendante du prix de la ressource et de l'incitation qu'elle procure pour mener une activité d'exploration. Les découvertes peuvent s'amenuiser suite à une surproduction relative de la ressource sur le marché provoquant un effondrement du prix. (2) Les analyses portant sur l'évolution des découvertes sur de larges secteurs géographiques - dont les délimitations sont politiques - sont biaisées car elles associent les découvertes dérivant de bassins géologiques différents (Lynch, 2002). Or, ces bassins géologiques obtiennent des rendements très disparates selon leur nature. (3) L'activité d'exploration et donc les quantités découvertes obéissent aussi à des déterminants politiques souvent imprévisibles (privatisation, nationalisation, politique fiscale...). (4) Le succès de l'exploration dépend aussi de la technologie disponible, si celle-ci s'améliore assez rapidement elle peut renverser la difficulté croissante à trouver des nouveaux gisements. (5) La découverte de nouveaux gisements ne mène pas systématiquement à une hausse des réserves notamment lorsque le filon est trop petit pour justifier son exploitation ou lorsque la concentration est trop faible pour garantir la rentabilité du site (Cleveland et Kaufman, 1991).

L'ensemble de ces facteurs livrent une réalité contrastée de l'indicateur de découverte en quantité. Dans les faits (voir le cas du cuivre et de l'or sur la Figure 3-4 et Figure 3-5), il paraît difficile d'observer des schémas précis d'évolution des découvertes, comme démontré dans l'article de Pyndick (1978). Parallèlement, Schodde (2010) constate qu'il existe un écart grandissant entre l'évolution des découvertes et des réserves en cuivre, cette déviation pouvant s'expliquer par les arguments exposés en (5). Dans ces conditions, comme l'évolution des découvertes en cuivre ne mène pas toujours à une hausse des réserves en cuivre, il paraît difficile de retenir cet indicateur pour anticiper la disponibilité future d'une ressource. Même le cas du pétrole dont l'épuisement a été le plus souvent évoqué, et qui semble suivre une évolution en U renversé jusqu'à la fin des années 90 (Figure 3-6), marque depuis les années 2000 une stabilisation des découvertes voire une lente remontée⁶², ce que laisserait supposer l'action des facteurs évoqués en (4).

Les découvertes ne permettent donc pas non plus d'anticiper la disponibilité physique ou économique d'une ressource naturelle et ces variations ne peuvent pas être interprétées comme le signal d'une variation de la rareté économique d'une ressource.

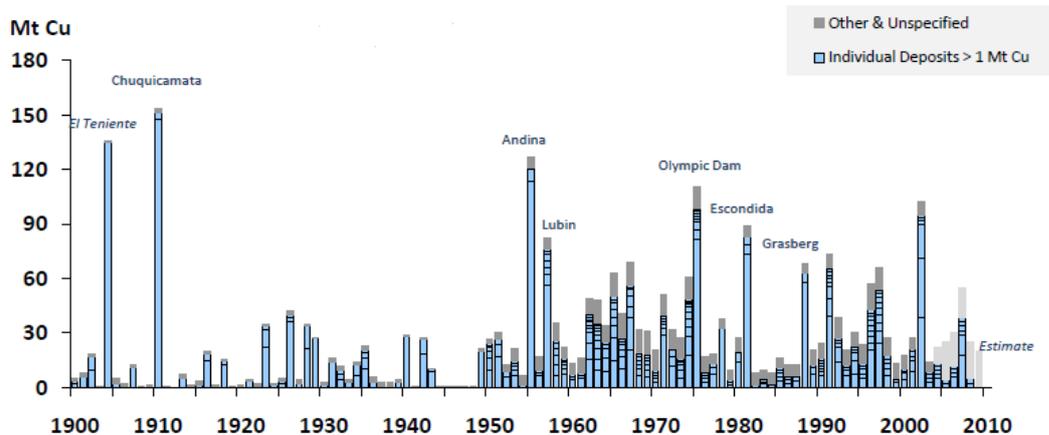


Figure 3-4 Evolution des découvertes de cuivre depuis 1900, Source : Schodde (2010, p.4)

⁶² Cette hausse des découvertes est très certainement liée à la valorisation des champs offshore très profonds ou des hydrocarbures non conventionnels.

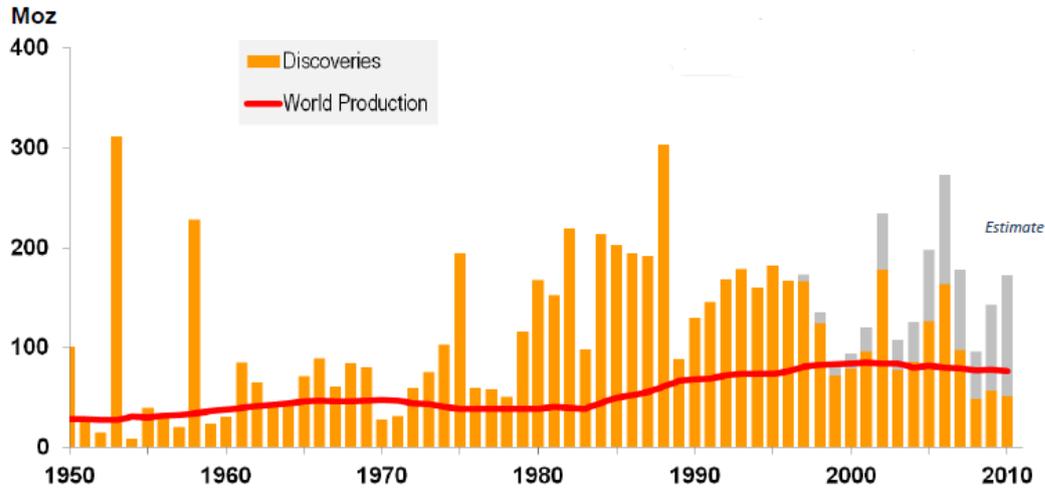


Figure 3-5 Evolution des découvertes d'or de 1950 à 2010, Source : Schodde (2011, p.31)

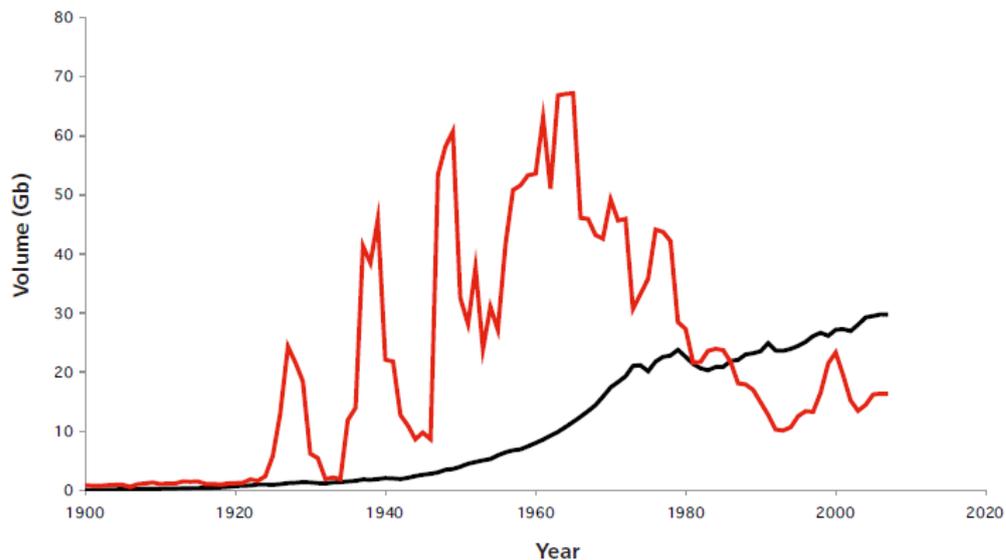


Figure 3-6 Evolution de la production et des découvertes de pétrole de 1900 à 2005, Source: Sorrell et Speirs (2009, p. 5292)

Nous avons vu précédemment que les ressources en place représentent un point fixe traduisant l'épuisement physique d'une ressource mais qu'elles ne fournissent aucune indication sur le point d'épuisement économique de la ressource. A l'inverse, les réserves prennent en compte la profitabilité économique et l'état des connaissances géologiques attachées aux gisements mais elles sont pour cette raison de nature à évoluer. Les chercheurs ont donc essayé par diverses méthodes de déterminer quel pourrait être le point intermédiaire d'épuisement économique d'une ressource. Ce faisant, ils sont parvenus au calcul des ressources ultimes.

2.5 Les ressources ultimes

Il existe plusieurs dénominations pour désigner ces ressources ultimes mais elles visent toutes à exprimer la quantité maximale de ressources recouvrables économiquement et techniquement dans le futur. Cet indicateur représente souvent un multiple de l'ordre de 5 à 10 des réserves connues, il relativise donc clairement l'horizon d'épuisement potentiel de la ressource (Figure 3-7). Par exemple, l'étude récente de l'UNEP (2011a) s'est référée aux ressources ultimes pour estimer les contraintes « optimistes » d'épuisement des ressources en métaux tandis que les contraintes « pessimistes » furent construites à l'aide du concept de *reserves base*. Les chercheurs étudiant les ressources ultimes dans ce rapport supposent une récupération de 0,01% à maximum 0,1% des ressources en place. Toutefois, il ne faut pas oublier que le coefficient rectificateur de 0,01% des ressources en place a été avancé par Erickson (1973) et correspond à un concept évolutif d'une manière similaire aux réserves.

Une autre technique, la linéarisation d'Hubbert, consiste à déterminer les ressources ultimes grâce au prolongement du trend production sur production cumulée. L'auteur et les partisans de cette technique font l'hypothèse que l'évolution du progrès technique et de l'activité d'exploration est déjà intégrée dans l'évolution passée de la production et que celle-ci est représentative des trends futurs affectant ces variables. Pourtant, les prévisions réalisées grâce à ce genre de technique sont régulièrement démenties par les faits empiriques et soulèvent des problèmes théoriques et méthodologiques importants (voir chapitre 2).

C'est pourquoi, même si beaucoup d'instituts et de chercheurs ont essayé d'évaluer ces ressources ultimement recouvrables, cet indicateur, à l'instar des réserves, nous replace dans une situation d'incertitude puisqu'il nécessite de faire des hypothèses sur les prix et les technologies futurs (Nordhaus, 1974). Nous ne pouvons donc pas utiliser cet indicateur comme un indicateur anticipé de la disponibilité économique d'une ressource naturelle.

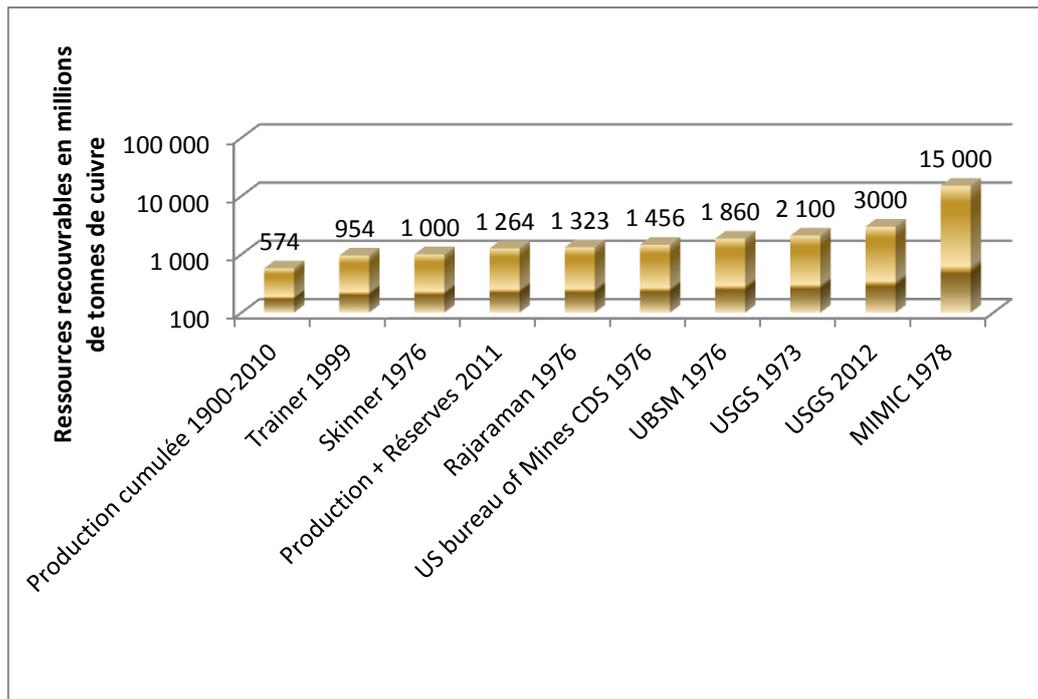


Figure 3-7 Estimations des ressources recouvrables en cuivre. Source : Trainer (1983), USGS, calculs de l'auteur

2.6 Conclusion sur les indicateurs géologiques

Les indicateurs géologiques permettent d'apprécier la rareté relative d'une ressource par rapport à une autre, dans la mesure où Skinner (1976) a dévoilé l'existence d'une forte corrélation entre l'abondance géologique d'un élément et la taille de ses réserves tandis que Phillips et Edwards (1976) ont explicité la liaison entre la concentration géologique des métaux et leur prix.

Cependant, ces mesures restent incomplètes pour apprécier la rareté liée à l'épuisement du fait notamment des incertitudes relatives à la prévision des découvertes, du progrès technique et des possibilités de substitution. C'est pourquoi il convient de se diriger vers l'exploration d'indicateurs économiques de la rareté.

3 Les indicateurs économiques de la rareté

Les approches standards d'évaluation de la rareté des ressources naturelles reposent la plupart du temps sur des indicateurs économiques de la rareté. Certains économistes vont même jusqu'à affirmer la suprématie théorique et empirique des indicateurs économiques sur les

autres indicateurs (Tilton, 2003). Le débat organisé autour de l'approche empirique de la rareté par les indicateurs relève de deux types de préoccupations :

- Une discussion centrée sur les mérites et les inconvénients à la fois théoriques et pratiques de chaque indicateur économique. L'objet principal est de déterminer le meilleur indicateur de la rareté.
- Un intérêt porté sur la détermination de trend à la hausse ou à la baisse dans la course de ces indicateurs afin d'évaluer la raréfaction dynamique d'une ressource épuisable.

On considère généralement trois catégories d'indicateurs économiques (les coûts, les prix et les rentes) et plus rarement on y rajoute l'élasticité de substitution.

3.1 Les coûts

La première tentative d'exploration de la rareté économique des ressources naturelles remonte probablement à l'initiative de la *President's Material Policy Commission* (1952) plus souvent connue sous le nom de Commission Paley. Ce rapport en cinq volumes commandité par le président américain Truman vise à établir les risques de pénuries sur certaines ressources naturelles suite à la reconstruction mondiale qui suit la 2^{ème} guerre mondiale. Pour reprendre les mots du président Truman, la commission a pour objectif de s'enquérir :

« into all major aspects of the problem of assuring an adequate supply of production materials for our long-range needs and to make recommendation which will assist me in formulating a comprehensive policy on such materials ». Volume I, p. IV

Le coût en termes d'homme-heure par unité d'output de ressources naturelles est une des premières voies d'investigation du rapport même si la commission admet que cet indicateur n'est pas complètement satisfaisant. Cet indicateur montre clairement un trend à la baisse depuis 1900 et cela jusqu'en 1940. Cette amélioration de la productivité du facteur travail est attribuée à la fois à l'usage de davantage de capital et d'énergie par travailleur. A partir de 1940, la remontée de la demande et les pénuries dues à la guerre ont stoppé le déclin de cet indicateur.

Les principales conclusions du rapport recommandent d'établir une analyse approfondie des besoins futurs des économies du monde libre ainsi que d'évaluer les capacités de l'offre à répondre à cette demande. Ces recommandations donnent lieu à la création en 1952 de *Resources For the Future*, une organisation indépendante à but non lucratif conduisant des recherches sur les questions liées à l'environnement, l'énergie et les ressources naturelles.

Une dizaine d'année plus tard, cette organisation finance l'étude de Barnett et Morse retranscrite dans l'ouvrage *Scarcity and Growth* (1963). Le travail de Barnett et Morse propose deux indicateurs de rareté des ressources naturelles fondés sur les coûts : le coût en terme de facteur travail (équation (3-1)) et le coût en terme de facteur travail et capital (ICU : indicateur de coût unitaire, équation (3-2)).

$$ICL = \frac{\left(\frac{L_t}{L_b}\right)}{\left(\frac{Q_t}{Q_b}\right)} \quad (3-1)$$

$$ICU = \frac{\alpha \left(\frac{L_t}{L_b}\right) + \beta \left(\frac{K_t}{K_b}\right)}{\left(\frac{Q_t}{Q_b}\right)} \quad (3-2)$$

Où t est l'année pour laquelle l'indice est calculé (de 1870 à 1957) et b l'année prise comme référence. L représente le facteur travail exprimé en nombre de travailleurs, K le capital reproductible évalué en prix constant, et Q la quantités de ressources naturelles en unité physique.

Comme les unités ne sont pas les mêmes, les coefficients de pondération α et β empêchent la survenue d'un biais d'agrégation. Ces coefficients sont repris d'une précédente recherche effectuée par Kendrick (1961) fournissant la part de chaque facteur dans les secteurs concernés par l'étude de Barnett et Morse.

L'indicateur de Barnett et Morse (B&M) met en évidence un trend à la baisse perpétuelle du coût des ressources naturelles quelle que soit la catégorie étudiée (à l'exception du secteur forestier). Les auteurs expliquent cette baisse du coût par l'effet conjoint du progrès technique, de l'effet substitution et des économies d'échelle. Pour étayer ces effets, les auteurs s'appuient sur un « *test de rareté faible* » (Barnett et Morse, 1963, p.202) qui permet d'effacer l'effet du progrès technique en comparant les trends de coûts dans les secteurs non extractifs et les secteurs de production des ressources naturelles. Les auteurs font l'hypothèse d'un progrès technique similaire affectant tous les secteurs de l'économie. Là encore, le trend à la baisse est stable (sauf pour le secteur forestier et le secteur de la pêche). L'expérience est réitérée plus tard par Barnett (1979) qui prolonge les données jusqu'en 1970 et conforte les résultats précédents rejetant l'hypothèse de rareté forte. Le constat est cependant plus mitigé en ce qui concerne l'hypothèse de rareté faible des ressources naturelles, acceptée dans 7 des

23 cas. Une autre étude lancée une année plus tard (Johnson et al, 1980) parvient aux mêmes résultats que Barnett.

Hall et al. (1987) étendent l'indicateur B&M en intégrant l'énergie comme troisième facteur de production. L'Indicateur de Coût Unitaire Généralisé ICUG s'écrit :

$$ICUG = \frac{\alpha \left(\frac{L_t}{L_b}\right) + \beta \left(\frac{K_t}{K_b}\right) + \gamma \left(\frac{E_t}{E_b}\right)}{\left(\frac{Q_t}{Q_b}\right)} \quad (3-3)$$

Où γ est le coefficient de pondération du facteur énergie et E le coût énergétique monétaire intégré dans l'ensemble des inputs à l'exception du facteur capital et travail.

Contrairement à l'ICU, l'ICUG fait apparaître une évolution des coûts en U sur la période 1963-1974 pour le charbon, le pétrole et le gaz.

Une approche différente de la rareté par le coût consiste à reprendre la méthodologie de Yaksic et Tilton (2009). Cette méthodologie s'inspire d'une vision ricardienne de la rareté associée à une volonté de prospective de l'indicateur de coût. L'objectif final visant à la construction d'une courbe de coût de long terme. Pour établir ce type de courbe, il faut identifier l'ensemble des gisements potentiels d'une ressource naturelle ainsi que les quantités et les coûts attachés à ces gisements. Plus la pente de cette courbe est raide et plus la ressource est rare. Une progression de la pente de coûts de long terme d'une ressource signifie aussi que celle-ci devient plus rare car plus difficile à extraire économiquement dans les conditions actuelles de progrès technique et de connaissances géologiques.

Les limites adressées aux indicateurs de coûts économiques peuvent être regroupées sous quatre catégories : les questions relatives à l'agrégation, à la substitution technique, au périmètre du système d'offre et au progrès technique. Ces points sont examinés ci-après.

La question de l'agrégation

Selon plusieurs auteurs (Smith et Krutilla, 1979 ; Brown et Field, 1978 ; Fisher, 1977), la construction de ce type d'indicateur pose des questions d'agrégation à plusieurs niveaux. Par l'agrégation des ressources naturelles entre elles tout d'abord puisque l'indicateur de coût est souvent un indicateur de rareté par secteur (par exemple les ressources minérales). La variable Q n'est donc absolument pas homogène. Ensuite, Barnett et Morse (1963) ont recouru à une pondération par les prix des différentes ressources minérales à une date donnée. Comme les prix évoluent en permanence, les auteurs ont examiné le résultat de plusieurs systèmes de

pondération en modifiant les dates de référence (1902, 1929, 1954). Le résultat final ne paraissant pas sensible à ces modifications, Barnett et Morse ont conclu à la fiabilité de cette agrégation. De la même manière, rien n'indique que les paramètres α et β ont été intégrés dans une vision dynamique. Par conséquent, le système de pondération des facteurs reste discutable (Peterson et Fisher, 1977).

La substitution technique

Hall et Hall (1984) contestent aussi la pertinence de l'indicateur B&M par la prise en compte exclusive du capital et du facteur travail. L'indicateur de rareté est biaisé et n'évalue pas la substitution entre le capital et le travail par l'énergie (Mackellar et Vining, 1989) et les ressources naturelles. Si l'indicateur de Hall et al. (1987) corrige en partie ce défaut, il n'intègre toujours pas l'apport matériel et non énergétique des ressources naturelles à la production et reste influencé par le pouvoir de marché de l'industrie énergétique.

Le périmètre du système d'offre

D'autres auteurs (Smith, 1980 ; Fisher, 1977) s'interrogent également sur le niveau adéquat du point de mesure des coûts au niveau de la chaîne de valeur des ressources naturelles (extraction, purification, raffinage, distribution). Si jamais une définition plus amont de la rareté des ressources naturelles était retenue (par exemple l'extraction), cela n'irait pas sans entraîner des problèmes de mesure, notamment dans l'isolation du coût de la rareté des autres coûts lorsque les industries sont intégrées verticalement (Neumayer, 2000). La construction de l'indicateur de coûts bute aussi sur des ressources naturelles exploitées en coproduit (Hall et al, 1987) car la détermination des coûts propres à chaque ressource passe alors par une clé de répartition des coûts souvent discutable. Brown et Field (1978) jugent erroné le sous-jacent théorique de l'indicateur de B&M qui obéit à une logique de moyenne alors que c'est le coût au niveau des unités marginales qui est déterminant. La plus importante critique adressée à l'indicateur de coût reste cependant sa focalisation sur le côté offre des ressources naturelles (Mackellar et Vining, 1989) et donc son indépendance vis-à-vis des préférences du consommateur (Smith, 1980 ; Rotillon, 2005). Cet inconvénient est interprété par Barnett et Morse comme un avantage, prétextant que leur indicateur contrairement à la rente, ne dépend pas de facteurs externes à la rareté comme le taux d'intérêt, la demande relative et les anticipations concernant la disponibilité future de la ressource (Barnett et Morse, 1963, p.225). L'indicateur de coût échoue aussi à rendre compte de la rareté future car il ne capture

pas l'effet futur indirect entraîné par la consommation d'une unité de ressource aujourd'hui (Fisher 1977), c'est un indicateur retardé de la rareté (Brown et Field, 1979).

Le progrès technique

L'indicateur de coût est indissociable du progrès technique, ce qui masque l'évolution de l'épuisement physique et économique de la ressource (Brown et Field, 1979).

Certaines ressources naturelles peuvent s'épuiser alors que l'indicateur de coût baisse indiquant dès lors une plus grande abondance, comme ce fut le cas pour le pigeon voyageur et certaines ressources halieutiques (Ozdemiroglu, 1993). La possibilité d'une courbe en U du prix réel de la ressource, alors que son coût continu à baisser sous l'effet du progrès technique, implique la possibilité d'une mauvaise interprétation de l'état d'épuisement de la ressource naturelle étudiée (Cleveland, 1993). L'exercice de Yaksic et Tilton (2009) vise à corriger l'aspect non anticipatif de l'indicateur de coût. Cependant leur courbe d'offre future dépend de façon inhérente du progrès technique futur. La courbe d'offre peut donc s'aplatir ou au contraire s'élever suivant l'évolution des connaissances géologiques et du progrès technique. Le caractère préventif de l'indicateur de coût reste donc très limité.

Enfin, au niveau empirique, l'indicateur de coûts n'est pas disponible car les données relèvent de la sphère privée et stratégique de l'entreprise (Halvorsen et Smith, 1984). Cette dernière contrainte explique aussi pourquoi les économistes se sont rapidement dirigés vers l'indicateur du prix.

3.2 *Les prix*

Relativement à l'indicateur de coûts, la littérature axée sur l'indicateur d'épuisement d'une ressource par le prix réel a fait l'objet de nombreuses applications. Ces études considèrent que l'indicateur de prix reflète correctement le niveau de rareté et l'évolution de celle-ci pour les ressources naturelles et qu'elles peuvent par conséquent en déduire la rareté d'une ressource en observant l'évolution de l'indicateur. Le prix est alors le plus souvent exprimé sous la forme de données annuelles temporelles déflatées.

L'évolution de cette littérature a connu quatre périodes distinctes en termes notamment de méthodes. On s'attardera sur la période récente.

Les premières analyses.

La première période se caractérise principalement par l'usage de méthodes statistiques relativement simples. Par exemple une observation visuelle de l'évolution de l'indicateur prix. Barnett et Morse (1963) ont ainsi construit un indicateur de prix relatif leur permettant de discerner si le prix des ressources naturelles (découpées en grands secteurs) évoluait plus ou moins vite que les prix des autres biens de l'économie sur la période 1870-1960. Compte tenu de la stabilité du rapport entre le prix des matières premières et le prix des autres produits non extraits (biens et services), ils rejettent l'hypothèse d'un accroissement de la rareté pour toutes les ressources naturelles à l'exception du secteur forestier et du secteur de la pêche. Un peu plus tard, Nordhaus (1974) démontre l'accroissement de l'abondance de l'ensemble des commodités en déflatant leur prix par le coût du travail. Simon (1981) parvient au même résultat en utilisant deux déflateurs différents (coût du travail, indice des prix à la consommation).

Seconde période

Dans une seconde période, les études menées sur l'indicateur du prix s'avèrent plus méticuleuses dans l'estimation statistique de ces trends et dans la stabilité de cette évolution. Ainsi, Smith (1978a, 1979) suggère à l'aide de divers tests statistiques (Quandt likelihood ratio et BDE^{63,64}) que les coefficients de trends attachés aux prix réels des commodités sont trop instables pour être interprétés quels que soient les déflateurs ou les spécifications du modèle utilisé. Il existe plusieurs évolutions du prix d'une commodité sur une très longue période. Uri (1995) parvient aux mêmes conclusions grâce à un modèle temporel économétrique permettant des ruptures décennales dans le niveau et le trend du prix des ressources naturelles grâce à l'aide de variables dichotomiques. L'auteur assurant qu'il n'y a pas de trend de long terme identifiable dans les séries de prix mais des mouvements de hausse ou de baisse identifiables à court terme notamment dans les années 70 et 80. De manière assez similaire, Hall et Hall (1984) trouvent une évolution significative et positive du prix des ressources énergétiques dans les années 70.

Troisième période

⁶³ Du nom de ces auteurs Brown, Durbin, Evan.

⁶⁴ Ce test s'appuie sur l'analyse réursive des coefficients et des résidus attachés à la régression linéaire expliquant un trend linéaire du prix d'une ressource naturelle.

Une troisième période connaît le développement d'une nouvelle spécification quadratique mise en évidence par des modèles théoriques, c'est-à-dire la détection d'un trend temporel quadratique dans les séries de prix. Le prix pourrait ainsi connaître une évolution en U au fur et à mesure de l'épuisement d'une ressource naturelle. En appliquant cette méthode au cas de 12 métaux, le test empirique quadratique de Slade (1982) se révèle bien adapté à la trajectoire des prix de 11 métaux sur 12 tandis que la spécification linéaire n'est acceptée que dans 7 cas sur 12. Suite à des critiques lui reprochant la sous-spécification de son modèle⁶⁵, Slade (1985) a démontré la robustesse de ces conclusions grâce à l'intégration de variables liées à l'influence de facteur de court terme (comme les guerres et les récessions) sur le prix. Toutefois, la véracité de ces résultats semble avec le recul fortement liée à la période d'estimation choisie : 1870-1978 (Pindyck, 1999). Les tentatives de réplification du travail de Slade par Ozdemiroglu (1993) par exemple convergent vers une relativisation de son travail (seules 10 commodités sur 39 attestent d'une relation quadratique significative) voire vers un bilan contradictoire (7 commodités sur 10 possèdent une évolution du prix en U inversé). A ce titre, la Figure 3-8 montre que le prix réel des métaux (en moyenne et en médiane) sur le très long terme ne semble pas présenter de tendance à la hausse ou à la baisse tandis que la présence d'un chemin en U ou en U inversé des prix ne peut être attestée que sur certaines sous périodes particulières.

⁶⁵ Slade (1982) ne tenait pas compte des facteurs de court terme en tant que variables explicatives, leurs assumant un rôle de bruit blanc sur long terme.

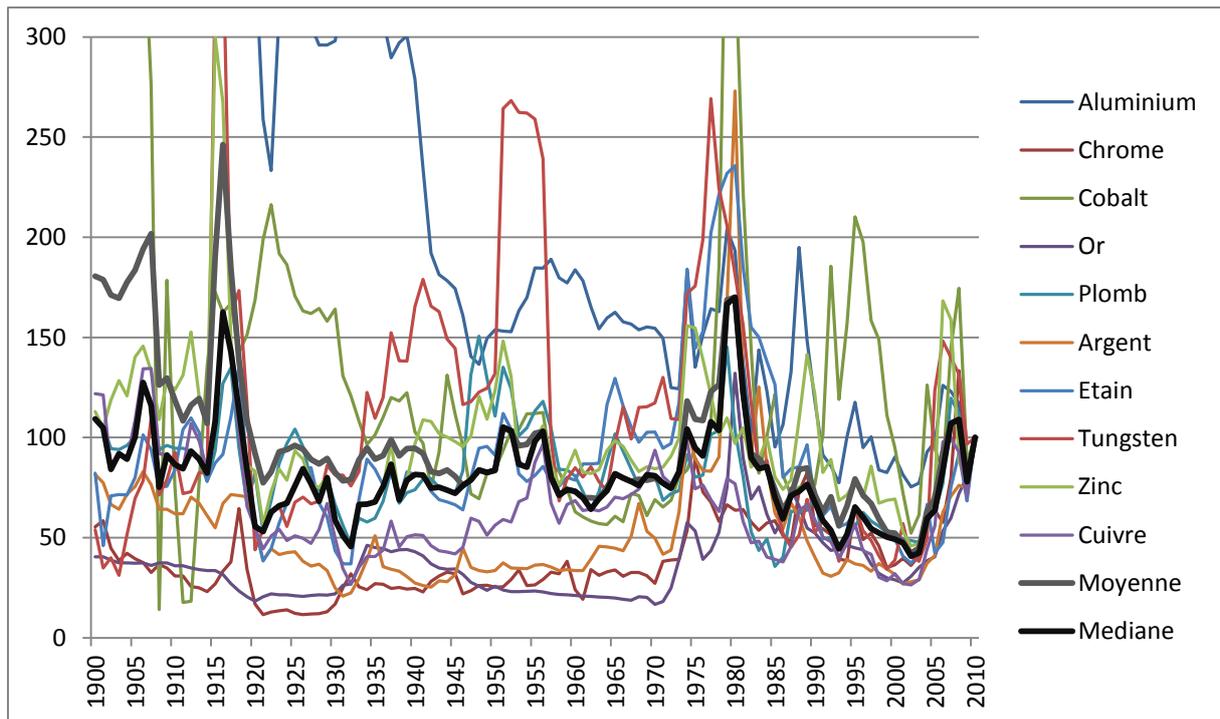


Figure 3-8 Evolution du prix réel de 10 métaux en indice (base 100= 2010). Source : USGS, calculs de l'auteur

Période récente : la nature des séries statistiques des prix

La quatrième période est axée principalement sur la détermination de la nature statistique des données de prix (Difference Stationnary DS, Trend Stationnary TS, ou changement de moyenne). En effet, l'évolution des séries de prix est souvent rattachée à deux types de natures sous-jacentes, une progression autour d'un trend (avec la possibilité de fluctuations stochastiques) ou une progression plus semblable à une marche aléatoire (comme les titres financiers). Ce débat sur le véritable comportement des séries de prix des commodités naturelles cache un enjeu considérable car l'acceptation de l'hypothèse de séries de prix DS rend caduque la possibilité d'utiliser l'indicateur du prix comme un signal de l'épuisement d'une ressource. Cette quatrième période marque aussi une sophistication des méthodes d'estimation avec le recours à des tests statistiques plus poussés même lorsqu'il s'agit d'évaluer des trends linéaires. Par exemple, Brown et Wolk (2000) reprennent la méthodologie classique d'estimation économétrique d'un trend linéaire mais avec la possibilité de permettre une rupture (en niveau et en pente du trend des prix) postulée de façon *a priori* durant la deuxième guerre mondiale et suivant deux déflateurs : l'indice des prix à la consommation et le salaire manufacturier. Les coefficients de trends de prix indiquent systématiquement des trends à la baisse sauf pour le gaz. Toth et Farkas (2011), quant à eux, effectuent des corrections sur le déflateur s'étalant de 0,5 à 1,5 point par an d'inflation en moins. Ces corrections les conduisent à accepter l'hypothèse de trend à la

hausse pour les quatre métaux de leur panel (cuivre, plomb, platine et rhodium), ce qui soutiendrait l'hypothèse d'un accroissement de la rareté de ces métaux sur le long terme.

Concernant la nature statistique des séries de prix des ressources naturelles, il ressort des différentes études une absence de consensus. L'enjeu est de statuer sur un processus DS qui conduirait à considérer l'évolution des prix comme une marche aléatoire et donc à une évolution de la rareté imprévisible sur le long terme ou à un processus TS qui signifierait qu'il existerait un trend à long terme dans les prix des ressources naturelles et donc que nous pourrions connaître leurs évolutions futures globales.

Voici retracées brièvement, les différentes études que nous avons pu recenser. Slade (1992) est la première à noter que leurs comportements n'est pas différents de celui des actifs financiers. Le prix des ressources en situation d'incertitude semble correspondre à une martingale, or la meilleure prévision de la valeur future d'une martingale est sa valeur présente. Un peu plus tard, l'étude menée par Berck et Roberts (1996) semble pencher en faveur d'une nature DS pour les séries de prix des ressources naturelles. Dans la foulée, Arhens et Sharma (1997) n'obtiennent pas de résultats tranchés malgré la diversité de leurs tests (test de Augmented Dickey Fuller ADF, test de Leybourne and McCabe LMC, test de Perron, test d'Ouliaris, Park et Phillips OPP). Cinq séries de prix convergent vers un processus DS et six vers un processus TS. Dans son importante synthèse sur l'épuisement des ressources, Krautkraemer (1998) juge que le comportement des prix des ressources naturelles sur le très long terme s'apparente davantage à un processus DS. Un point de vue également partagé par Cuddington (2010) et Svedberg et Tilton (2006). Le futur est de façon inhérente incertain et par conséquent le prix futur est impossible à prédire (Tilton et Lagos, 2007). Au contraire, Pindyck (1999) postule l'hypothèse d'un processus TS avec des fluctuations stochastiques autour du trend. Cette spécification semble convenir d'après lui à deux ressources énergétiques sur trois (pétrole et charbon) mais pas au gaz. Lee et al (2006) usent des tests usuels pour déterminer si une série de prix est plutôt DS ou TS mais leur méthodologie autorise la possibilité de deux ruptures endogènes dans le niveau et la pente du trend. Ce type de méthode les conduit à rejeter systématiquement l'hypothèse DS au profit de l'hypothèse TS. Ils n'identifient après coup que 59% des ruptures décelées statistiquement. Enfin, Sharma et al. (2009) proposent encore une autre explication possible de la nature des prix des ressources naturelles. Via le test de Bai et Perron pour dater les ruptures, ils démontrent la stationnarité des séries autour de multiples ruptures (en général deux ou trois

selon la ressource étudiée⁶⁶). L'évolution des prix serait, d'après ces derniers, un changement de moyenne épisodique plutôt qu'une série de prix de nature DS ou TS. En dehors des ruptures détectées causées par des événements majeurs, les prix restent relativement inchangés.

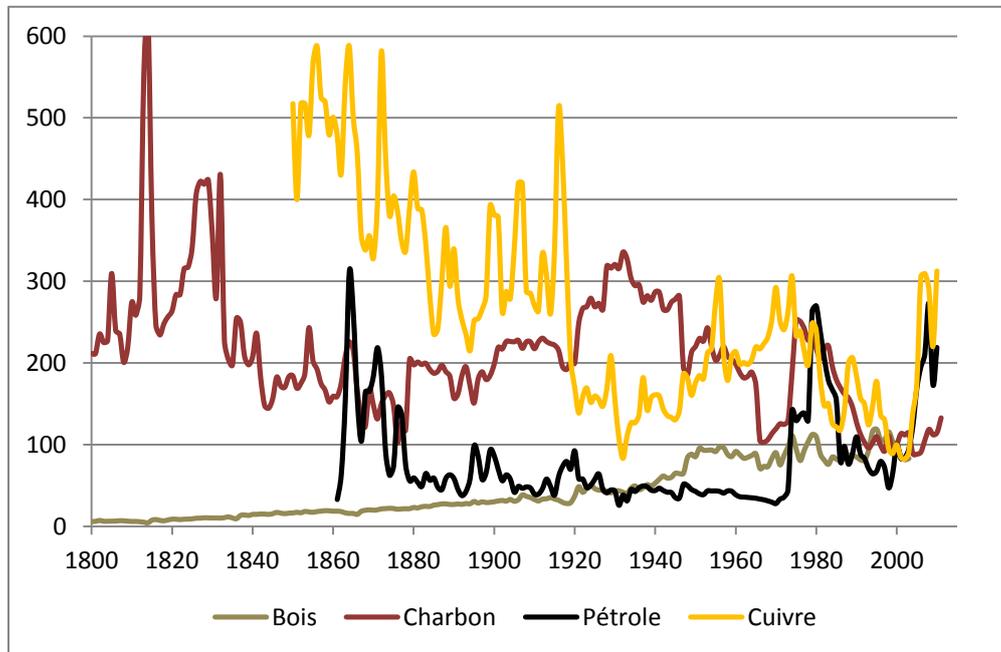


Figure 3-9 Evolution du prix réel de quatre ressources naturelles en indice (base 100=2000). Source : USGS, BP statistical Review (2013), U.S. department of Agriculture, U.S department of commerce, *calculs de l'auteur*

Si le prix regroupe plus de partisans comme mesure de rareté que le coût, c'est que ce dernier capte des signaux aussi bien du côté offre que du côté demande, tout en permettant d'intégrer le coût d'opportunité de la consommation présente. C'est d'ailleurs pourquoi Fisher (1977, 1979) se déclare favorable à cette mesure de l'épuisement d'une ressource qui incorpore à la fois le coût et la rente de rareté. Toutefois, le prix reflète l'état d'épuisement d'une ressource mais aussi un ensemble de conditions physiques, économiques, psychologiques liées au marché, aux acteurs et à leur environnement. Ainsi, une modification de l'indicateur peut être la conséquence d'un changement du taux d'intérêt, de facteurs institutionnels (politique fiscale, subvention, régulation...), de la structure du marché (oligopole, monopole...), d'une pression exercée par les syndicats (Cleveland, 1993 ; Hall et Hall, 1984 ; Johnson et al., 1980 ; Smith et Krutilla, 1979) ou de tensions géopolitiques (Percebois, 2009). Des causes plus précises encore peuvent aussi jouer de façon importante sur l'équilibre des prix sans modification de la rareté liée à la ressource comme la valeur du dollar dans les échanges

⁶⁶ Les auteurs ont porté leurs tests sur l'aluminium, le charbon, le cuivre, le fer, le plomb, le nickel, le pétrole, l'argent et l'étain.

mondiaux⁶⁷ (Mackellar et Vining, 1989) ou la structure de la dette des pays exportateurs de la ressource⁶⁸ (Slade, 1992). A ce titre, l'étude de Gleich et al. (2013) révèle l'influence de plusieurs facteurs de criticité⁶⁹ non liée à l'épuisement sur le prix des métaux.

Il existe deux positions sur l'influence de ces facteurs de court terme évoqués précédemment sur la course des prix à long terme : Slade (1982) les considère comme des bruits blancs ne brouillant pas le chemin du prix à long terme tandis que Cairn (1990) juge que ces variables agissent de façon purement aléatoire et empêchent la lecture de l'évolution des prix par les fondamentaux⁷⁰. Les Figure 3-8 et Figure 3-9 représentant la course du prix réel de certaines commodités à long terme semblent davantage donner raison à Cairn sur ce point. Le prix du bois, qui est pourtant une ressource renouvelable, est probablement celui qui suit la trajectoire la plus proche de la règle d'Hotelling, à savoir une montée continue de son prix. Par ailleurs, plusieurs auteurs ont exprimé l'incapacité du prix à remplir son rôle d'anticipation de la rareté et de l'épuisement en l'absence de marché futur pour la plupart des ressources minérales épuisables⁷¹ (Peterson et Fisher, 1977 ; Brown et Field, 1978 ; Stiglitz, 1979 ; Neumayer, 2000).

De façon identique au coût, l'indicateur prix peut être impossible à établir lorsqu'il existe des situations d'intégration verticale des firmes. Cette stratégie d'intégration verticale tend à se répandre notamment sur le marché des petits métaux car elle minimise le risque de rupture d'approvisionnement et fait disparaître le risque prix lié à sa volatilité et au taux de change. L'ensemble de ces inconvénients a poussé de nombreux économistes à militer en faveur de la rente de rareté.

3.3 Les rentes

Une autre possibilité pour mesurer la rareté d'une ressource naturelle consiste à observer l'évolution de la rente de rareté. Les applications concernant la mesure de la rente de rareté sont plus rares car celle-ci n'est pas observable directement (Brown et Field, 1978 ; Neumayer, 2000). Il faut donc construire cet indicateur pour observer son comportement.

⁶⁷ La plupart des commodités sont libellées en dollars alors même qu'elles peuvent être extraites dans des zones géographiques où le dollar n'a pas cours. Une variation du taux de change va donc modifier le prix de la ressource.

⁶⁸ Un pays fortement endetté dont la ressource naturelle constitue une des seules rentrées de devises et de richesses peut être amené à surproduire la ressource.

⁶⁹ Comme le HHI producteurs, le HHI pays, les stocks, le recyclage, le PIB, le taux d'intérêt...

⁷⁰ D'après Cairn, la règle d'Hotelling n'aide alors ni à prédire ni à comprendre les prix.

⁷¹ Seulement onze métaux parmi plus d'une cinquantaine possèdent un marché à terme.

L'une des premières analyses à proposer une mesure de l'indicateur est celle de Brown et Field (1978) appliquée au secteur forestier de 1910 à 1970. La rente de rareté est ici directement observable via le prix des droits à la coupe⁷². Durant la période analysée, la rente forestière connaît une multiplication par quatre de son prix réel alors même que le coût d'extraction baisse. Cette première application conforte les arguments de Brown et Field qui militent en faveur de la rente et en défaveur du coût comme indicateur de la rareté. Une seconde analyse proposée par Devarajan et Fisher (1982) et focalisée sur les coûts de découverte du pétrole de 1946 à 1971, renforce également la vraisemblance de l'hypothèse d'un accroissement de la rareté des ressources naturelles. La rente de rareté du pétrole passe ainsi de 0,46\$ constant par baril à 1,38\$ durant cette période. Un an plus tard, Stollery (1983) via un modèle d'optimisation, démontre également une hausse légère de la rente de rareté associée au nickel de 1950 à 1971. Au contraire, Halvorsen et Smith (1984) trouvent une valeur fortement décroissante de la rente de rareté des minerais canadiens sur la période 1956-1974 alors même que leurs prix sont en légère hausse. La rente débute à 100 en valeur réelle au début de la période et termine à une valeur plus de cinq fois moindre (17,6). A nouveau, Pesaran (1990) tout comme Lasserre et Ouellette (1991), parviennent à observer des rentes de rareté en chute que ce soit pour les réserves de pétrole du plateau continental du Royaume-Unis ou pour l'industrie minière canadienne d'Asbestos. En fait, Krautkraemer (1998) estime que les études empiriques associées à la rente de rareté - comme les autres indicateurs - n'ont pas réussi pour l'instant à montrer une hausse ou une baisse de la rareté systématique des ressources naturelles et donc un accroissement ou une baisse de la rareté liée aux ressources naturelles. Cette conclusion s'applique évidemment aux résultats opposés de Cleveland (1991b) et Watkins (2006). Le premier, analysant les coûts de découverte du pétrole américain sur la période 1936-1988, exhibe une rente de rareté clairement à la hausse, bondissant d'environ quelques centimes à 15\$ (constant 1982) par baril. Le second, quant à lui, observe grâce aux ventes des réserves plutôt une trajectoire en U de la rente de rareté du pétrole sur la période 1982-2003, la rente de rareté évoluant alors entre 3 et 10\$ (constant 2003) par baril.

La rente de rareté a bénéficié de l'appui de nombreux chercheurs (Brown et Field, 1978 ; Gaudet, 1984; Neumayer, 2000 ; Rotillon, 2005). Elle pose un ensemble de questions à la fois théoriques et pratiques. Théoriques tout d'abord, car comme le mentionnent Cairn (1990),

⁷² En anglais, les auteurs font référence au *stumpage price*.

Giraud et Nappi (1994), Hart et Spiro (2011), la rente de rareté est quasi nulle si l'horizon d'épuisement de la ressource est suffisamment lointain. Il apparaît donc difficile de mesurer de si faibles variations. D'autres questions portent sur la construction de l'indicateur. Le coût de découverte proposé par Brown et Field (1978) ne permet pas, en effet, d'évaluer correctement la rente de rareté car le secteur de l'exploration, génère aussi une rente d'exploration difficile à estimer (Fisher, 1978). Seul le coût marginal de découverte complet incorporant le coût de découverte marginal et la rente d'exploration fournit une mesure correcte de la rente (Lasserre, 1985). De manière identique, la rente obtenue suite au prix net du coût d'extraction apparaît comme biaisée car elle inclut plusieurs autres types de rente (rente différentielle, rente de monopole, quasi-rente...) en plus de la rente de rareté (Santopietro, 1998 ; Grafton et al, 2004). Par ailleurs, on avance aussi que les données nécessaires à la construction de l'indicateur sont souvent privées ou indisponibles. Les voies de construction de l'indicateur offrent pourtant des options considérablement plus nombreuses aujourd'hui que dans les années 70. Rotillon (2005) en présente trois (coût de découverte, prix net du coût d'extraction et valeur d'échange des réserves) mais il en existe en réalité plus du double incluant des variantes assez subtiles (voir encadré).

Les principaux détracteurs de la rente de rareté lui opposent d'être influencée par des facteurs externes à la rareté de la ressource (Barnett et Morse, 1963) et de suivre des trajectoires totalement aléatoires. Cleveland et Stern (2001) considèrent que les variations de la rente attachée au secteur forestier sont davantage guidées par des mesures politiques de court terme que par les difficultés naturelles de production. La rente peut aussi sous certaines conditions diminuer alors que la ressource s'épuise⁷³ (Peterson et Fisher, 1977 ; Stern, 1999a) et suivre théoriquement des trajectoires non monotones sous des hypothèses suffisamment générales (Farzin, 1992). Par conséquent, cela prescrit son utilisation comme indicateur de l'épuisement et amoindrit la possibilité d'une prévision de l'évolution de la rareté de la ressource naturelle.

⁷³ Ce qui pourrait expliquer que Slade (1992) observe des rentes déclinant encore plus vite que les prix.

Encadré 3-1 : Les mesures de la rente de rareté

Santopietro (1998) a exploré différentes mesures de la rente de rareté. Il distingue sept constructions différentes :

- La valeur actualisée des flux futurs de revenus de la firme extrayant la ressource naturelle.

$$\int [p_t q_t - q_t c_t] e^{-rt} dt / S$$

- Le prix net des coûts d'extraction (incluant ou non un taux de rendement des actifs fixes et/ou les coûts d'exploration et de développement).

$$(pq - \text{coûts d'opération}) - r(\text{stock de capital} + \text{coût de développement et d'exploration} - \text{amortissements}) / q$$

- La méthode d'El-Serafy.

$$[p - c] e^{-rT}$$

- Le prix de soutenabilité.

$$[ps - c] e^{-rT}$$

- La valeur d'échange des réserves.

$$\text{Prix de transaction} / S$$

- Le coût de remplacement.

$$[p - c] - \text{coût de développement}$$

Ou coûts de découverte

- La valeur des réserves de la firme via une approche comptable.

$$[Dettes + (\text{prix de l'action} \times \text{nombre de parts}) - K] / S$$

Où p, prix de marché par baril, c, coût moyen de production, q, quantités extraites par période temporelle, r, taux d'actualisation, S, taille du stock, K, capital, T, durée de vie des réserves, ps, prix de soutenabilité (*backstop technology*).

Mise à part le prix de soutenabilité, l'ensemble des mesures oscillent entre 2 et 6\$ par baril de pétrole en 1998 pour la firme YPF.

3.4 L'élasticité de substitution

L'élasticité de substitution, si elle est moins reprise comme indicateur de la rareté que les trois premiers indicateurs économiques, constitue parfois une solution alternative avancée pour

mesurer la rareté d'une ressource naturelle. Si l'on reprend les mots de Stiglitz (1979), une ressource naturelle pose problème si elle est épuisable, non recyclable, essentielle à la production, non substituable par une autre ressource naturelle, et que le développement d'un substitut n'apparaît pas envisageable. Pour être essentielle à la production au sens de Stiglitz, une ressource naturelle doit détenir une élasticité de substitution inférieure à 1 par rapport au capital. Ce point ne peut être confirmé car les études empiriques sur l'estimation de l'élasticité de substitution, entre les ressources naturelles et le capital, ne convergent pas et les valeurs de l'élasticité s'étendent sur des plages négatives et positives avec également des chiffres en absolu supérieurs à l'unité (voir l'état de l'art de Smith (1980)).

Ces résultats s'expliquent à la fois par les problèmes d'agrégation affectant la technologie et les ressources naturelles (Smith, 1980 ; Smith et Krutilla, 1984), le capital, le travail et les biens intermédiaires (Ozdemiroglu, 1993) mais aussi par la spécification des modèles et le type d'échantillons utilisés. Concernant les problèmes d'agrégation, les analyses évaluant ce type d'élasticité proposent souvent des chiffres au niveau d'un secteur, voire d'une économie entière, alors qu'elles adoptent une fonction de technologie unique. On peut supposer par conséquent l'existence d'un biais d'agrégation impactant la valeur de l'élasticité dont la grandeur variera selon l'effet de composition du groupe d'entreprises de l'échantillon (Smith, 1980). La correction de ce biais nécessite d'engager des études à des niveaux très désagrégés que ce soit pour les firmes ou les ressources naturelles⁷⁴. Concernant, la spécification des modèles, les études considèrent souvent une technologie statique et une élasticité constante de substitution ce qui ne reflète probablement pas la réalité. Enfin, les résultats semblent très sensibles au type d'échantillons (séries temporelles ou coupe instantanée).

3.5 Conclusion sur les indicateurs économiques

Les indicateurs économiques alimentent toujours un débat assez vif sur la pertinence de l'information qu'ils transmettent et sur les limites inhérentes à chacun des indices.

Plusieurs auteurs expliquent l'irrésolution de cette polémique autour des indicateurs économiques de la rareté par les différents sens prêtés à la rareté par chacune des écoles. Ainsi, Hall et Hall (1984) pensent qu'il existe quatre types de raretés fondamentales attachées aux ressources naturelles. Ces quatre notions dérivent des interprétations Ricardiennes et Malthusiennes de la rareté. Si on reprend l'analyse de Malthus, il existe une limite physique

⁷⁴ Celles-ci sont souvent considérées comme un tout et mélangées à l'énergie.

absolue à l'exploitation des ressources naturelles alors que Ricardo ne distingue pas de limite absolue mais un continuum de qualités d'une ressource liée de façon inverse à son coût d'extraction. Ces deux visions sont couplées ensuite aux notions de stock et de flux de chaque rareté. Selon chaque type de rareté le prix ne mesure plus la même chose et les indicateurs appropriés divergent.

- La rareté malthusienne de stock suppose un montant physique fixe de la ressource et un coût d'extraction constant. Il existe une relation du type :

$$P = C + \lambda \quad (3-4)$$

- La rareté malthusienne de flux considère un montant physique fixe de la ressource et un coût d'extraction croissant avec la vitesse de production.

$$P = C + \lambda + ES \quad (3-5)$$

- La rareté ricardienne de stock rend compte d'une absence de limite fixe à la ressource avec un coût d'extraction dépendant du rythme actuel de production et de la production cumulée passée.

$$P = C + ES \quad (3-6)$$

- La rareté ricardienne de flux présume l'absence d'une limite fixe à la ressource et un coût d'extraction dépendant du rythme de la production.

$$P = C \quad (3-7)$$

Où P est le prix de la ressource, C le coût d'extraction, λ la rente de rareté et ES l'effet de stock représentant la valeur actualisée des coûts futurs d'extraction.

Une autre explication avancée par Stern (1999a) et Cleveland et Stern (2001) propose une focalisation sur la rareté d'usage et la rareté d'échange comme principal point de désaccord. Cette approche dérive de l'analyse de Commons (1934). Si on souhaite évaluer la rareté d'usage, autrement dit l'utilité procurée par le bien, il vaut mieux utiliser les indicateurs de coûts qui reflètent l'efficacité et la productivité des facteurs de production. Au contraire, les indicateurs comme la rente et le prix représentent la valeur d'échange respectivement de la ressource en terre et de la commodité.

Ces indicateurs économiques ont aussi des limites communes qui rendent difficile leur utilisation et leur interprétation. Tout d'abord, l'évolution de ces indicateurs monétaires nécessite d'être déflatée, alors que le problème du numéraire approprié (indicateur de prix à la consommation, prix à la production, salaire moyen, prix à l'exportation...) n'est pas résolu. Quand bien même, les études empiriques parviendraient à un consensus sur le numéraire correct à utiliser, la mesure de l'inflation soulève des questionnements. En effet, Svedberg et Tilton (2006) considèrent que les déflateurs actuels surestiment l'inflation de 0,5 à 1,5 point par an. Cette mauvaise appréciation de l'inflation au cours du temps a trois causes : le biais de substitution, le biais provenant de nouveaux produits et le biais de qualité⁷⁵. Cette surestimation de l'inflation conduit à sous-estimer la hausse du prix réel des commodités naturelles voire à interpréter une baisse de la rareté au lieu d'un accroissement de celle-ci. De plus, certaines ressources naturelles ou certains services rendus par l'environnement (aménités naturelles) n'appartiennent pas à la sphère marchande, leur rareté échappe donc à la régulation du marché (Krutilla, 1967 ; Fisher 1979 ; Krautkraemer, 2005). Ces ressources naturelles et ces services rendus gratuitement par la nature à l'homme possèdent une valeur ajoutée pour la production humaine mais ne sont pas monétisés ou monétarisables et subissent un épuisement et une dégradation accélérée du fait de leur libre-accès (biens communs). La dégradation de ces services est encore sous-estimée lorsqu'ils sont non substituables et lorsque le processus de dégradation se caractérise par son irréversibilité.

D'une façon générale, Smith (1978b) et Fisher (1979) soulignent la focalisation des indicateurs économiques sur la rareté privée des ressources. Cela sous-tend aussi la sous-estimation du coût social réel d'une ressource naturelle marchande du fait de la présence de nombreuses externalités négatives en aval, et l'usage de services naturels et de ressources naturelles non marchandes (eau, air) en amont de la production.

Noorgard (1990 ; 1991) a mis aussi en lumière une logique fallacieuse implicite au raisonnement sur les indicateurs économiques de la rareté. En effet, l'exercice, associé aux indicateurs de rareté économique, vise à déterminer si une ressource est rare. On postule pour cela que les informations sur la rareté des ressources détenues par les agents transparaissent dans la course des indicateurs via le jeu du marché (achats, ventes, anticipations) sous réserve

⁷⁵ Le biais de substitution désigne les erreurs d'estimation du panier de biens considéré pour mesurer l'inflation qui n'est réajustée qu'une fois par dizaine d'années. Les nouveaux produits sont souvent intégrés dans le panier du consommateur des années après leur première apparition tandis que les améliorations de la qualité mais sans baisse du prix du produit ne sont pas prises en compte (ex : ordinateur).

que les agents soient correctement informés. Seulement, la théorie économique aurait oublié, d'après Noorgard, de s'assurer si la prémisse nécessaire à la vérification de cette première hypothèse est correcte, à savoir constater que les agents sont correctement renseignés sur l'état de rareté de la ressource. Pour évaluer la véracité de cette hypothèse, il faut auparavant déterminer si les ressources sont rares. Or, la résolution de ce raisonnement circulaire est logiquement impossible. L'hypothèse d'information parfaite des agents est rarement remplie, qui plus est sur des marchés où coexistent à la fois une forte concentration des acteurs de l'offre, une intégration verticale des entreprises, des marchés à terme souvent incomplets et une évaluation des gisements relevant parfois davantage de l'incertitude radicale que du risque. Farrow et Krautkraemer (1991) ont critiqué l'approche de Noorgard en estimant que l'objectif final des indicateurs économiques n'est pas de connaître la vraie rareté des ressources mais d'évaluer l'évolution de la croyance des agents connectée à la rareté d'une ressource naturelle. Si cette explication ne suffit sans doute pas à lever les doutes pesant sur les indicateurs économiques de la rareté, elle correspond davantage à la réalité des marchés des ressources naturelles frappés par la constitution et la disparition de paradigmes très marqués⁷⁶ (voir Fizaine et Dufour, 2014). Heuterkes (2007) estime la critique de Noorgard non seulement justifiable en théorie mais surtout réaliste empiriquement. Comme évoqué précédemment les agents économiques seraient incapables d'établir le coût d'usage de la ressource s'ils souhaitaient l'intégrer dans leurs analyses. Mais il va plus loin en pensant que les agents économiques n'intègrent pas de coût d'usage à l'exploitation des ressources épuisables pour au moins trois raisons : (1) ils expriment un optimisme naïf sur la capacité du progrès technique à trouver toujours plus de ressources. (2) Ne connaissant pas le niveau des contraintes géologiques, ils utilisent alors les ressources épuisables comme n'importe quelles autres ressources non épuisables. (3) L'horizon de prévision des agents économiques (consommateurs, traders, entreprises) est trop court pour connaître l'épuisement de la ressource donc pour intégrer le coût d'usage de la ressource épuisable.

D'une autre façon, Smith (2011) signale que la théorie économique sur les ressources épuisables a démontré la possibilité d'une infinité de chemins non monotones pour les indicateurs économiques d'une ressource épuisable (Farzin, 1995). On ne peut donc pas interpréter l'épuisement d'une ressource en observant simplement l'évolution passée d'un

⁷⁶ Le prix des ressources énergétiques mais surtout les anticipations de leurs valeurs futures sont en partie guidées par l'état des croyances des agents économiques quant aux développements des technologies futures et de l'accessibilité des ressources épuisables. L'histoire des énergies est marquée par de nombreux retournements de paradigmes suivant les espoirs et les doutes placés dans les énergies traditionnelles ou alternatives.

indicateur économique. Il vaut mieux essayer de détecter les ruptures de l'indicateur économique manifestant une modification du chemin optimal d'épuisement de la ressource plutôt que l'évolution du chemin optimal.

Tilton (2003) juge encore les mesures économiques défailantes car seuls les individus disposant d'un pouvoir d'achat en monnaie peuvent « voter » sur le marché et influencer la rareté des ressources naturelles. La distribution des revenus au niveau mondial joue donc un rôle majeur quant à la détermination des niveaux de prix des ressources naturelles. Dans la mesure où la consommation en ressources naturelles par tête n'est pas une fonction linéaire du niveau de revenu de l'individu, une distribution inégalitaire des revenus au niveau mondial a pour conséquence de sous-estimer l'équilibre de prix qui résulterait d'une distribution plus égalitaire. De la même manière, les individus qui verront le jour plus tard n'ont pas d'impact sur le prix de la ressource naturelle ce qui pourrait là encore conduire à une sous-estimation du prix de la ressource prenant en compte l'intérêt de ces futurs individus. Enfin, Tilton rappelle que les indicateurs économiques n'évaluent que la rareté des ressources naturelles procurant de l'utilité à l'homme, or d'autres espèces ou ressources qui n'ont pas nécessairement de valeur pour l'homme possèdent une valeur intrinsèque non évaluée par le marché.

Il apparaît également que l'ensemble de la littérature sur les indicateurs économiques, consacrée à la rareté et à l'épuisement des ressources naturelles, a tendance à entretenir la confusion entre rareté et épuisement. Si la rareté incorpore la notion d'épuisement, elle ne synthétise pas uniquement les variations de ce terme. Or, si les indicateurs économiques comme le prix ou la rente ne parviennent pas à nous fournir des informations non ambiguës sur le niveau d'épuisement d'une ressource, ils réussissent néanmoins à transmettre de l'information sur le niveau de rareté privée de la commodité ou de la ressource en terre.

Ces limites ont conduit les recherches vers des approches complémentaires afin d'appréhender une partie de la rareté qui leur échappait jusqu'alors.

4 Les indicateurs sociaux-environnementaux de la rareté

Les indicateurs socio-environnementaux sont issus principalement de l'approche de l'économie de l'environnement, à l'exception de l'indicateur de coût énergétique dérivé de l'approche biophysique. Ces deux approches nourrissent une finalité commune - valoriser ce qui échappe aux indicateurs économiques - mais adoptent des stratégies différentes. La

première fondamentalement inspirée par l'approche néoclassique, applique diverses méthodes afin de donner un prix à ce qui échappe au marché. Au contraire, l'approche biophysique considère la vision économique traditionnelle comme une mauvaise interprétation de la réalité et propose une théorie énergétique de la valeur.

4.1 Les indicateurs de coût en énergie

L'objectif de cette sous partie est de montrer les fondements sur lesquels s'appuie l'approche biophysique pour construire son indicateur de rareté énergétique. Nous analyserons ensuite les principaux résultats de la littérature pour déterminer si cet indicateur appuie l'hypothèse d'un accroissement de la rareté des ressources naturelles et s'il comporte d'éventuelles limites.

Selon l'approche biophysique, il n'existe que deux facteurs primaires de production prenant la forme de matière et d'énergie de basse entropie (Cleveland, 1991a). Un facteur primaire de production est un facteur nécessaire à la production mais qui ne peut pas être produit à l'intérieur du système économique. L'énergie et la matière répondent à ces critères puisque l'homme ne peut pas les fabriquer mais simplement les récupérer et les concentrer. Les facteurs de production intermédiaires sont créés et recyclés à l'intérieur du système économique par une combinaison de facteurs primaires et intermédiaires. C'est le cas du capital, du travail mais aussi de la technologie endogène au système économique et nécessitant de l'énergie. Le processus de croissance a débuté lorsque l'homme a basculé vers des types d'énergies dégageant des surplus énergétiques supérieurs aux surplus obtenus grâce à l'énergie humaine et animale jusque là. Ce surplus s'est diffusé dans l'ensemble des secteurs de l'économie et a permis aux activités humaines de produire davantage de biens et services par unité de travail ou de capital.

Formellement, soit R , une unité de ressource standard et R_u une unité de ressource spécifique qui doit être améliorée par de l'énergie directe et indirecte qui, elle, est contenue dans les matières premières, le capital et le travail :

$$R = f(R_u, E_d + I_m + I_l + I_k) \quad (3-8)$$

Où E_d représente l'énergie directe utilisée dans le processus de production tandis que I_m , I_l et I_k symbolisent l'énergie indirecte incorporée, respectivement, dans les matières premières, le travail et le capital.

Le coût en énergie indirecte du capital (I_k) et des matières premières (I_m) a été calculé en multipliant les dépenses de capital et de matières premières par leur intensité énergétique. L'intensité énergétique du travail (I_l) est estimée par la quantité de combustible et d'électricité achetée par les ménages et divisée par le revenu total.

Le processus de production de nos économies se résume donc à utiliser de l'énergie sous sa forme directe et indirecte :

$$R = f(Ru, Ed + Ei) \quad (3-9)$$

Or, il existe une relation générale entre la qualité d'une ressource naturelle et son coût énergétique humain ($Ed + Ei$). Pour parvenir à un niveau de basse entropie, c'est-à-dire sous sa forme la plus pure et la plus désirable (une unité standard de ressource R), la matière incorpore à la fois un coût environnemental énergétique⁷⁷ - c'est le processus naturel qui grâce à l'énergie concentre les minéraux et dégrade les composés organiques en pétrole – et un coût énergétique humain (Cleveland, 1993). Ces deux coûts sont inversement liés. Lorsque la nature a mis à disposition de l'homme des ressources en matière et en énergie de très basse entropie cela signifie que le coût environnemental énergétique est élevé mais que le coût énergétique humain pour obtenir une unité standard de ressource sera relativement faible et réciproquement. Cette relation entre qualité entropique des ressources naturelles et coût énergétique déployé par l'homme pour obtenir de la matière utilisable est avérée dans les faits (voir Singer, 1977 et Prior et al., 2011). Par exemple, plus l'entropie d'une ressource naturelle est forte (donc plus sa teneur est faible), plus il faut d'intrants en énergie, en eau et en acides pour produire une même quantité de métal. La technologie peut permettre de nous rapprocher du contenu minimum énergétique requis pour obtenir cette unité de ressource standard mais ne peut en aucun cas violer cette relation. Par conséquent, si les ressources s'épuisent nous devrions constater que le coût énergétique humain pour extraire et standardiser une unité de ressource naturelle augmente. L'approche biophysique vise à construire un indicateur de rareté basé sur ce coût énergétique unitaire (mesuré en termes de Btu) :

$$Ce = \frac{Q}{Ed + Ei} \quad (3-10)$$

⁷⁷ Ce coût environnemental énergétique n'a aucun rapport avec le coût environnemental de l'énergie désignant généralement les coûts externes associés à l'énergie.

Où C_e désigne l'inverse du coût énergétique, Q la quantité d'output exprimée dans une unité physique, E_d et E_i les quantités d'énergie directes et indirectes exprimées en Btu (*British Thermal Unit*). Lorsque l'indicateur progresse (diminue), cela signifie que l'on produit davantage (moins) d'unités de ressources naturelles par unité de Btu. Autrement dit, la rareté diminue (augmente) car nous avons besoin de moins (plus) de valeur énergétique pour produire une unité de ressource naturelle.

Dans son article de 1991 (Cleveland, 1991a), Cleveland a construit cet indicateur pour différents secteurs (les mines, la pêche, l'agriculture, et l'énergie) ainsi que pour certaines ressources de ces secteurs (plusieurs métaux, les hydrocarbures, les phosphates, les sables et graviers, l'argile...). Le secteur minier fait apparaître une évolution en cloche de l'indicateur entre 1919 et 1982 (Annexe 3-4), ce qui signifie qu'il a été de plus en plus facile de produire ces ressources jusqu'au pic de l'indicateur (au milieu des années 50) et qu'ensuite il a fallu toujours plus d'énergie pour produire une même unité de métal. Ce résultat sous-tendrait une difficulté énergétique croissante à extraire des métaux, conséquence d'une exploitation d'une qualité entropique toujours plus faible de minerais. Le secteur de la pêche montre une évolution encore plus préoccupante puisque son indicateur chute perpétuellement. Une remarque pertinente consisterait à rejeter cette inquiétude si le surplus énergétique tiré de la production énergétique devenait dans le même temps plus élevé.

L'indicateur C_e appliqué au secteur énergétique consiste à calculer le EROI (*Energy Return on Investment*) ou taux de retour énergétique :

$$EROI = \frac{E_o}{E_d + E_i} \quad (3-11)$$

Où E_o désigne l'énergie obtenue (sous forme de pétrole, gaz, électricité...). Les EROI du secteur pétrolier mais aussi du secteur du charbon (Annexe 3-5) ont connu une évolution haussière à partir du début du siècle pour connaître un pic dans les années 60-70 et chutent depuis jusqu'à la fin de la période étudiée (1987). Le secteur énergétique dégage donc un surplus énergétique par unité de produit de plus en plus faible. Il faut ainsi pour maintenir un surplus énergétique équivalent aux autres secteurs non énergétiques, produire toujours plus d'unités énergétiques (mètre cube de gaz, tonnes de pétrole, MWh...). La situation deviendra critique lorsque l'EROI se rapprochera de plus en plus de la valeur unitaire au niveau général du secteur énergétique. Cette question est analysée dans le chapitre 6 de la thèse.

Les indicateurs établis dans les équations (3-10) et (3-11) restent cependant perfectibles car si la quantité thermique contenue dans un Btu de pétrole et de charbon est identique, la valeur d'usage d'un Btu de pétrole est plus élevée qu'un Btu de charbon tout simplement parce que le niveau d'entropie d'un Btu de pétrole est plus faible qu'une Btu de charbon. Autrement dit, un Btu de pétrole apporte davantage de travail mécanique qu'un Btu de charbon, leur valeur d'usage et d'échange ne sont donc pas les mêmes. Il faudrait donc corriger ces indicateurs par le type d'énergie utilisée (pétrole, gaz, charbon, électricité...). Le EROI exprimé en Btu peut donc être corrigé de deux manières selon Cleveland (1992). Une première voie de correction consiste à concilier l'approche biophysique et l'approche néoclassique en pondérant l'unité thermique par le prix de marché de l'unité thermique de la ressource énergétique envisagée (pétrole, gaz, charbon...) ou par le produit marginal au niveau de l'économie de chaque ressource. Par exemple, le pétrole a un produit marginal par unité thermique supérieur au charbon d'environ un facteur 1,6 à 2,7 et une unité thermique d'électricité apporte un produit marginal à l'économie environ 2,7 à 14,3 fois supérieur à celui du charbon. Une seconde voie consiste à choisir l'exergie comme facteur correcteur donc à s'intéresser au potentiel d'une unité thermique pour réaliser un travail⁷⁸ (Wager et Classen, 2006). A nouveau, dans cette optique, l'électricité possède un facteur correcteur plus important que le pétrole ou le charbon car l'exergie de l'électricité est plus importante que l'exergie d'une même quantité thermique de pétrole. La quantité d'exergie disponible dans une unité thermique d'énergie dépend des pertes induites lors du fonctionnement du processus économique. Or, l'utilisation du pétrole ou du charbon génère des pertes de conversion plus importantes que l'électricité lorsqu'on transforme ces énergies en travail mécanique, ce qui se traduit par une quantité d'exergie moins élevée.

La correction de la qualité de l'énergie utilisée dans les indicateurs de coûts énergétiques peut faire varier considérablement les résultats, en affectant à la fois le niveau de l'indicateur et la forme de son évolution (Cleveland, 1992 ; 2005)

La théorie énergétique de la valeur et les indicateurs de coûts énergétiques restent cependant sujet à controverse. Tout d'abord, Stern (1999b) reproche à l'indicateur d'ignorer un troisième facteur primaire de production. En effet, produire du capital et du travail ne se résume pas à

⁷⁸ L'énergie ne peut être créée ou détruite. Wall (1986) décrit l'exergie comme la part convertible d'énergie totale qui peut être transformée en autre forme d'énergie. Une autre conséquence dérive du concept d'exergie (Wall, 1986, p.4) : « When the energy loses its quality this means that exergy is destroyed. The exergy is the part of energy which is useful in the society and therefore has an economic value and is worth taking care of. »

appliquer de l'énergie à la matière mais incorpore aussi de l'information. L'information est accumulée dans la production de connaissances et la connaissance permet de produire autant de capital et de travail avec moins d'énergie. La valeur varie donc aussi en fonction de la quantité de ce troisième facteur informationnel. Cela a pour conséquence de brouiller la relation linéaire qui pourrait exister entre quantités d'énergies requises dans la fabrication du travail et du capital et leur valeur. Par ailleurs, même en supposant une relation linéaire entre la valeur d'un bien et la quantité d'énergie incorporée dans celui-ci, le coût énergétique d'une ressource naturelle peut évoluer à la hausse sous l'effet d'un abaissement du prix de l'énergie conduisant un effet de substitution favorable à l'énergie (Cleveland et Stern, 1999). Suite à une telle situation, on substitue de l'énergie directe à du travail/capital, faisant croître parallèlement le coût énergétique sans que la qualité de la ressource ait été modifiée. Pour continuer, le coût énergétique du travail tel qu'il est calculé suppose que l'énergie incorporée dans le travail ne soit utilisée qu'à des fins de construction exclusives du facteur travail. Or, en réalité la consommation énergétique du facteur travail peut déboucher sur la production d'inputs autres que le travail. Cette omission conduit certainement à des biais d'agrégation au niveau de l'indicateur du coût énergétique. Autant d'éléments que Stern revendique pour contester une approche biophysique qui ne se résume pas, d'après lui, à une approche exclusivement énergétique.

Plus généralement, l'indicateur de coût énergétique apporte une vision différente et complémentaire résultant d'une logique non économique (principalement fondée sur la qualité entropique des ressources naturelles), mais souffre aussi, comme d'autres indicateurs, de biais dus à la substitution par d'autres facteurs comme le travail ou le capital. On remarquera aussi qu'il omet toujours la valeur des services fournis par la nature via des processus échappant au marché (aménités naturelles, services d'assimilation des déchets...). Il n'indique donc pas la rareté complète d'une ressource naturelle.

4.2 *Les autres indicateurs environnementaux*

La sphère hors marché des ressources naturelles sur laquelle s'adosse en partie l'activité d'extraction privée des ressources naturelles de marché n'a pas été exclue du champ d'étude des économistes. Ils y font référence depuis longtemps (voir Krutilla, 1967), mais de fait les effets non marchands échappant à la régulation du marché limitaient les analyses empiriques :

« On sait que les ressources naturelles ont une valeur d'usage, parfois très élevée puisque le degré de qualité des écosystèmes peut conditionner la survie des espèces végétales, animales, et de l'espèce humaine, mais que pendant longtemps elles n'ont eu aucune valeur d'échange alors que leur rareté et leur utilité relatives augmentaient. Or dans une économie essentiellement marchande, l'absence de valeur d'échange est souvent confondue avec une valeur nulle. Il en résulte un gaspillage et une destruction accélérée de ces ressources. »
Vallée (2004, p.274)

Outre le fait que l'on dégrade ou consomme trop rapidement les éléments naturels propres à cette sphère non-marchande, Smith (1978b, p.289) suggère qu'il en résulte également une sous-estimation du prix réel des commodités naturelles marchandes :

« It restricts them to only those commodities exchanging on private commodity markets, thereby excluding the whole range of environmental common property resources. This omission is important to the evaluation of natural resource scarcity. The focus on private market transactions alone ignores the fact that some resolutions of a materials scarcity may usurp the services of one or more of these common property resources that do not appear through market exchanges. As a result, there is a potential for bias in the past economic evaluations of resource availability. »

En présence d'externalités, le niveau d'activité d'exploitation des ressources naturelles marchandes est donc non optimal comme relaté dans l'article de Smith et Krutilla (1979). D'une part, l'activité d'extraction et de raffinage des ressources naturelles génère d'importantes externalités négatives (voir encadré) dont la plupart ne sont pas encore totalement internalisées malgré la croissance des normes sanitaires et environnementales. D'autre part, l'activité de production de ressources naturelles profite d'un ensemble de services et de biens communs générés par l'environnement et les écosystèmes qui ne sont ni valorisés ni rémunérés.

Cela a pour conséquence une sous-estimation du prix réel – social - de la commodité naturelle marchande (Slade, 1992) donc, à demande égale, une surconsommation de la ressource (Figure 3-10).

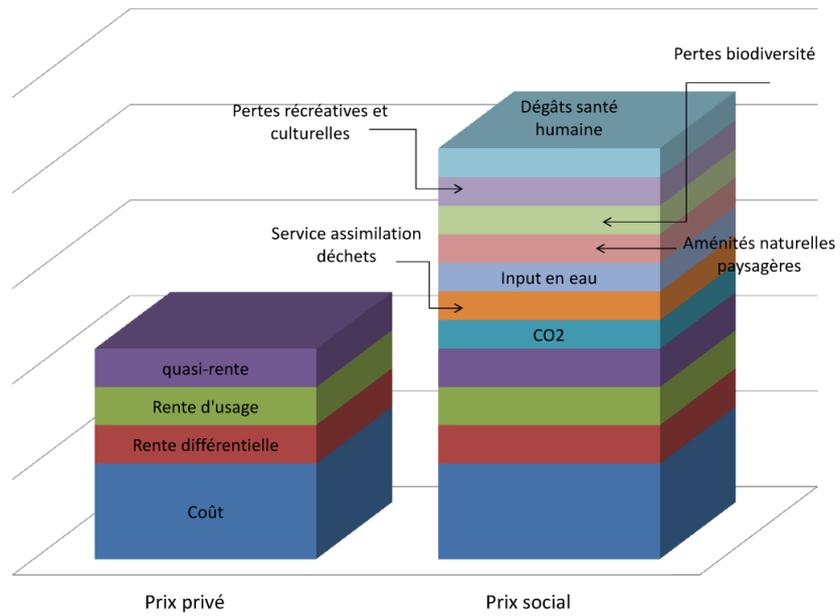


Figure 3-10 prix intégrant les coûts privés et les coûts sociaux. Source : auteur

Encadré 3-2 : Conséquences et impacts induits par l'activité minière

Les documents mis à disposition par l'*Environmental Law Alliance Worldwilde* (2010) et l'UNEP (2013) fournissent un bilan assez exhaustif de l'ensemble des dégâts susceptibles d'être associés à n'importe quelles activités minières. En effet, l'exploitation de ressources naturelles impacte tout au long de sa chaîne de valeur la faune et la flore mais également les populations locales. Ces externalités négatives empruntent divers canaux de transmission (souvent reliés entre eux) dont voici quelques exemples :

- Une dégradation de la qualité de l'eau des rivières, lacs, eaux de surfaces et souterraines *via* le drainage d'acide, l'érosion des sols et des déchets de miniers aboutissant dans les eaux de surface, les fuites ou les ruptures des bassins de décantation. Cette dégradation peut prendre plusieurs formes comme une acidification de l'eau (PH= 4), une contamination par les métaux lourds et toxiques (cadmium, mercure, plomb, cyanure...) et par des fines particules de déchets miniers diminuant les possibilités de survie de la faune et flore marine. L'exhaure des mines est aussi une source de préoccupation majeure puisqu'elle peut conduire à une modification du bassin hydrologique régional, et à la disparition de la couverture végétale en surface suite à la baisse du niveau des nappes phréatiques, voire à la contamination de ces nappes.
- Une diminution de la qualité de l'air *via* l'émission de particules et gaz polluants (métaux lourds, monoxyde de carbone, dioxyde de soufre, et oxyde d'azote) par les sources mobiles, fixes et les installations d'enrichissement des métaux.
- Des nuisances sonores liées au forage, l'extraction, le broyage, le transport...
- Une dégradation accélérée des sols et de leur érosion mais aussi leur contamination par des métaux lourds et des acides rendant parfois impropres l'activité agricole aux alentours.
- Un impact sur la faune, la flore et l'écosystème *via* la dégradation, le morcellement et la perte de leur habitat naturel initial.
- Un effet sur les valeurs sociales en poussant au déplacement et à la réinstallation des populations locales. La migration de travailleurs vers des régions minières auparavant peu denses peut générer des externalités négatives pécuniaires et non pécuniaires. L'activité minière suscite aussi des conflits d'usage sur les ressources en eau, forestières, immobilières pouvant donner lieu à des affrontements très violents avec les populations locales. La dégradation de la qualité de l'eau, de l'air et du sol a également des conséquences négatives sur la santé humaine des travailleurs et des populations locales. Cette détérioration de la santé prend la forme d'une hausse de la mortalité, de la morbidité et du nombre de personnes affectées par des incapacités. Enfin, l'activité minière peut détruire totalement ou partiellement, pour une durée temporaire ou permanente, des ressources culturelles (terres sacrées, zones récréatives et touristiques...) d'une manière directe (site minier) ou indirecte (infrastructures d'accès, vandalismes par les populations non locales...).
- Un impact sur le changement climatique causé par une perte d'absorption du CO₂ liée à la déforestation minière et par l'émission directe de gaz à effet de serre par les machines et les procédés de transformation des métaux.

Il existe toutefois des normes environnementales et sociales permettant de limiter ces externalités négatives même si leurs applications restent très variables selon les pays.

L'excès de surconsommation des ressources marchandes sous l'effet d'une sous-estimation du prix réel dépend de l'élasticité prix de la demande pour cette ressource (dépendant elle-même des possibilités de substitution).

Supposons la situation d'une ressource naturelle quelconque illustrée par la Figure 3-11, l'internalisation des externalités négatives conduit à réduire les quantités de Q à Q^* lorsque la demande est faiblement élastique au prix. Au contraire, on observera une plus grande diminution de la quantité de la ressource naturelle demandée lorsque les externalités négatives sont intégrées dans les coûts privés d'un producteur face à une demande élastique au prix (Q à Q^*). Bien entendu, un degré plus élevé de sous estimation du coût social favorise aussi la surconsommation de la ressource malgré une demande pour la ressource assez peu élastique au prix.

Compte tenu de la faible valeur de l'élasticité prix de la demande en énergie fossile⁷⁹ (voir Wong et al, 2013), la large sous-estimation du coût social de l'usage des énergies carbonées (36\$ par tonne de CO₂⁸⁰) ne devrait pas accélérer fortement l'épuisement de celles-ci. En ce qui concerne le cas des métaux de base, l'étude d'Ewans et Lewis (2005) indique des valeurs d'élasticité-prix de la demande similaires aux combustibles fossiles⁸¹, tandis que le coût social lié au CO₂ de ces derniers varie grandement selon la concentration des métaux et leur technique d'extraction et de concentration⁸². La situation des métaux rares pourrait être plus préoccupante car nous pouvons penser que l'élasticité prix de la demande pour ces ressources est beaucoup plus élevée, compte tenu des larges possibilités de substitution entre ces métaux. Il n'existe pour l'instant aucune étude, à notre connaissance, nous permettant d'évaluer l'élasticité prix de ces métaux rares.

⁷⁹ Pour la demande d'énergie fossile sur la zone des pays de l'OCDE, Wong et al (2013) ont estimé une élasticité au prix du pétrole de -0,017 à court terme et -0,118 à long terme.

⁸⁰ Ce chiffre est une valeur centrale du coût social du carbone tel que déterminée par l'administration américaine en 2013. Cela correspond à un coût social lié au CO₂ de 110\$ par tonne de pétrole (auquel on devrait ajouter le coût des émissions de CO₂ pour produire le pétrole) si on reprend les chiffres du coût du CO₂ de l'administration américaine.

⁸¹ L'élasticité prix de long terme de l'aluminium et du nickel est respectivement de -0,08 et -0,10.

⁸² Le coût social lié au CO₂ équivaldrait à 576 \$ par tonne de nickel, 220\$ par tonne de cuivre et à 750 \$ par tonne d'aluminium sous l'hypothèse que le coût social du CO₂ soit évalué à 36\$ par tonne de CO₂. Toutefois, le coût social total des métaux excède le coût social lié au CO₂ des métaux.

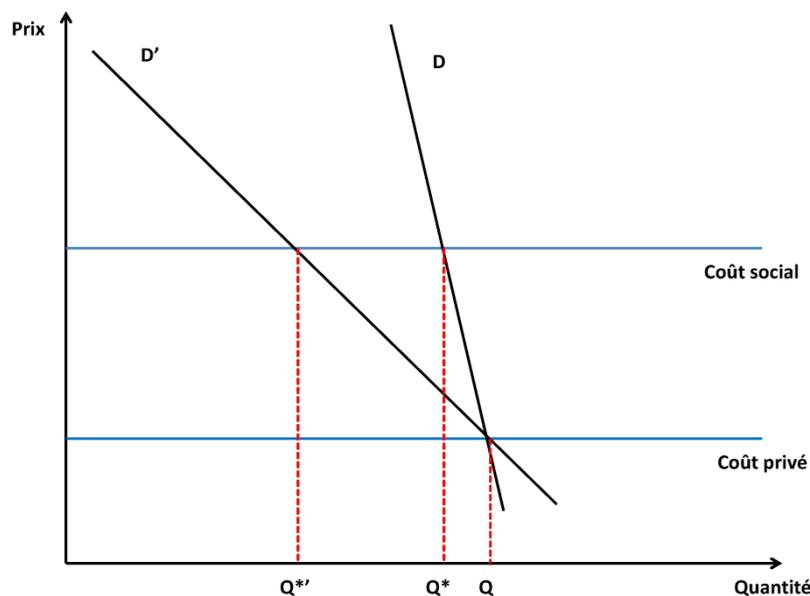


Figure 3-11 Surconsommation de la ressource selon le degré d'élasticité de la demande au prix. Source : auteur

Nous pouvons penser que l'évolution de cet indicateur social devrait suivre une évolution davantage monotone que le prix ou les coûts privés car ces derniers peuvent bénéficier du progrès technique lorsque la qualité de la ressource diminue, alors que de nombreuses externalités sont inversement proportionnelles à la qualité des ressources. Si l'on suit l'analyse de cycle de vie de Prior et al. (2011), par exemple, une ressource de très faible qualité nécessite plus d'énergie, plus d'eau, plus de produits chimiques et détruit davantage de biens communs et services naturels pour être produite. Dans ce cas, les externalités de la production d'une ressource de faible qualité sont élevées puisqu'il faut extraire davantage de déchets miniers (morts-terrains et résidus d'extraction) pour une même quantité de métal et l'usage de plus d'énergie génère davantage de CO⁸³. D'autres études de type analyse de cycle de vie menées à la fois en coupe transversale⁸⁴ (Mudd et Diesendorf, 2008 ; Northey et al., 2013) et en séries temporelles (Memary et al., 2012) ont validé cette relation inverse entre qualité d'un minerai et la quantité d'inputs nécessaires à l'extraction d'une tonne de métal. Or, malgré la hausse de l'activité d'exploration, les études académiques constatent une baisse continue sur 150 ans de la concentration moyenne des gisements en exploitation (Mudd, 2007 ; Mudd, 2010). La technologie peut atténuer l'impact environnemental d'une

⁸³ Les applications mobiles de l'énergie sollicitent une grande puissance mécanique qui rend improbable son remplacement rapide par de l'énergie électrique elle-même produite à partir d'énergie peu carbonée.

⁸⁴ Une illustration de cette relation inverse entre concentration d'un minerai et énergie requise est fournie par Northey et al. (2013) et est disponible à la fin du chapitre (Annexe 3-6).

dégradation qualitative des minerais en abaissant par exemple l'énergie requise pour extraire un métal d'une concentration donnée. Toutefois, il existe un minimum théorique à cette efficacité énergétique, constaté par Norgate et Haque (2010) et l'UNEP (2013). Pour ajouter à cette limite, Memary et al. (2012) constatent, grâce à une analyse de cycle de vie temporelle menée sur le cuivre, une rapide annihilation de l'effet du progrès technique à moyen terme par la baisse qualitative du minerai.

On constate qu'il n'existe pas à ce jour - à ma connaissance - de mutualisation des méthodes d'évaluation environnementale pour rendre compte du véritable coût social minier. En effet, d'une part, il existe un champ de l'économie reposant principalement sur l'analyse coût-bénéfice visant à valoriser les biens communs via des méthodes directes ou indirectes⁸⁵. D'autre part, l'économie propose des instruments pour internaliser les externalités négatives⁸⁶. Mais nous n'avons pas d'études permettant à la fois d'intégrer dans le coût social minier, l'internalisation des externalités négatives et le coût des biens communs dégradés ou détruits. L'intégration de l'ensemble de ces coûts sociaux pourrait considérablement modifier le prix des « commodités naturelles » et par ce fait leurs consommations. Dans certaines situations, l'internalisation d'une plus grande part des coûts conduirait à l'annulation du projet minier tandis que dans d'autres cas, le projet minier pourrait être réalisé mais dans des conditions de coûts nettement plus défavorables qu'aujourd'hui. Une méthodologie permettant de réaliser ce type d'étude consisterait à passer par plusieurs étapes illustrées par la Figure 3-12.

⁸⁵ La valorisation des biens communs peut s'appuyer sur des méthodes directes du type préférences exprimées (évaluation contingente) ou indirectes avec des méthodes liées à l'observation des préférences révélées (coûts hédonistes, coûts de transport, dépenses de protection). Pour en savoir plus, se reporter aux ouvrages de Vallée (2002), Bontems et Rotillon (2007), Perman et al. (2011), et Pearce et Turner (1990).

⁸⁶ L'internalisation de certaines externalités négatives minières a déjà été réalisée notamment dans le cadre européen (marché de quotas de CO₂) ou plus largement dans les pays industrialisés via des normes environnementales (comme la réglementation REACH).

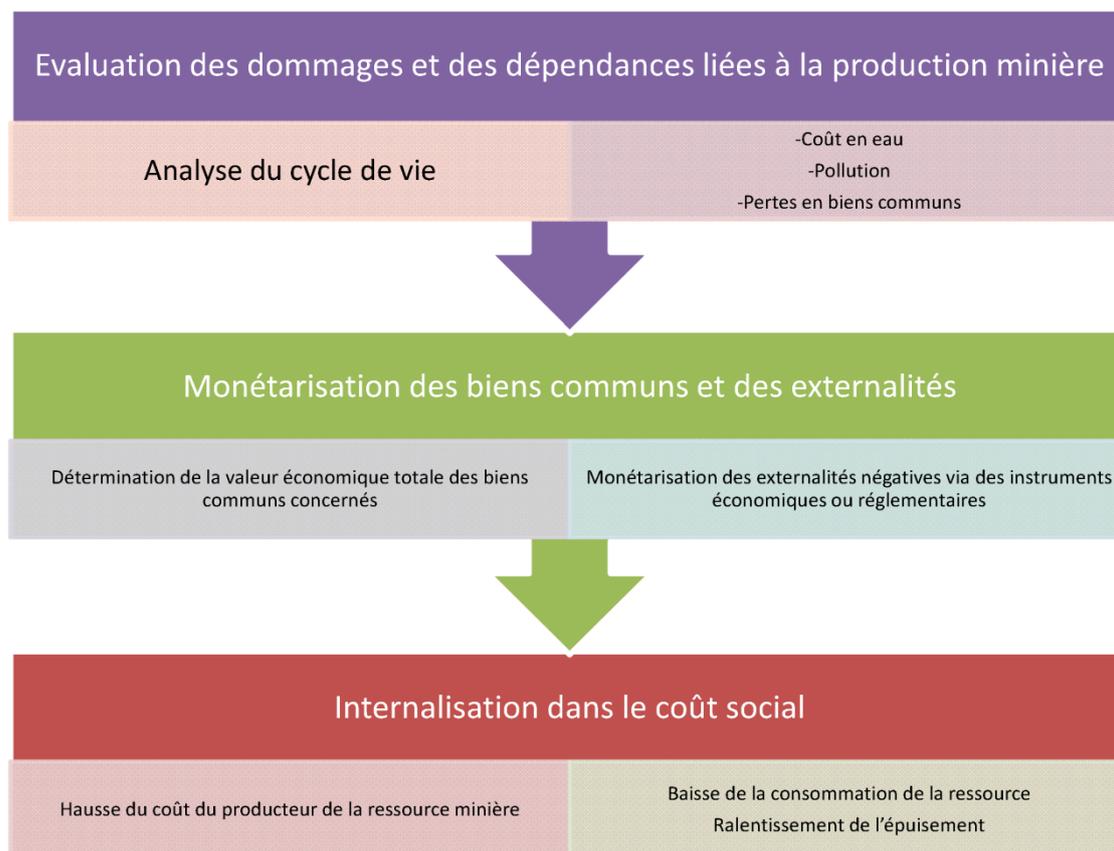


Figure 3-12 Méthodologie propre à l'internalisation de l'ensemble des coûts sociaux miniers. Source : auteur

Toutefois, ces méthodes de monétarisation de la sphère non marchande suscitent quelques questionnements qu'il convient de souligner. Tout d'abord, la théorie distingue la valeur d'usage des biens environnementaux d'autres valeurs de non usage des biens environnementaux (valeur d'existence, valeur de legs). Comment cumuler ces valeurs ? Bontems et Rotillon (2007), soulignent qu'il est délicat de les additionner dans la pratique car elles ne sont pas indépendantes. Les méthodes de monétarisation des biens environnementaux souffrent de nombreux biais. Par exemple, le biais d'inclusion amène un individu à confondre la valeur accordée à une tribu de panda sur un segment forestier donné et la valeur accordée à l'espèce entière au niveau mondial. Le consentement à payer pour protéger le panda est alors identique quelle que soit l'échelle considérée. Or la monétarisation des biens communs comme la biodiversité d'un hectare de forêt menacée par un projet minier nécessite la correction de ce biais. Pour continuer, Diamond (2000) manifeste des doutes sur la monétarisation correcte de la biodiversité du fait de la simple référence à un écosystème, complexe et non réduit à une échelle locale. Pour terminer, on revient dans ces analyses aux référentiels économiques des surplus du consommateur via les consentements à payer.

L'utilité des individus dans ces méthodes, qu'elles soient directes ou indirectes, est assimilée à une valeur monétaire, avec toutes les critiques liées notamment à l'évaluation d'un standard dépassant les clivages « riches » - « pauvres » ou « Nord » - « Sud » et qui dépassent notre thèse. Une base de données comme l'EVERY (*The Environmental Valuation Reference Inventory*) correspond à ce type d'initiative et fournit l'opportunité de corriger au moins partiellement ce biais. Il resterait à construire l'évolution temporelle du prix réel d'une ressource naturelle intégrant à la fois les externalités négatives et le coût des biens communs dégradés ou détruits pour pouvoir disposer d'un indicateur économique reflétant la rareté totale d'une ressource naturelle. Un objectif pour l'instant hors de portée compte tenu de l'indisponibilité de ces données pour les métaux rares.

4.3 Conclusion générale sur les indicateurs

Au terme de cette présentation, nous avons mis en lumière l'existence de nombreux indicateurs et leurs limites. Il peut paraître fondamental de revenir sur l'importance de ces indicateurs. Tout d'abord leur existence et leur diversité répondent sans doute au besoin de pouvoir gérer correctement les ressources naturelles par peur d'arriver à cours de celles-ci, un peu à la manière d'un conducteur sans tableau de bord s'apercevant que son réservoir est vide.

Indicateur	Variation de la disponibilité	Indicateur anticipé de la disponibilité	Point d'épuisement	Rareté relative entre ressources
Les ressources en place	non	non	oui : physique	oui
Les réserves	non	non	non	oui
Le R/P	non	non	non	non
L'évolution des découvertes	non	non	non	non
Les ressources ultimes	non	non	non	oui
Les coûts	oui (rareté privée d'usage)	non	non	oui
Les prix	oui (rareté privée d'échange)	théorique: oui/empirique: indéterminé	non	oui
Les rentes	oui (rareté privée d'échange)	théorique: oui/empirique: indéterminé	non	oui
L'élasticité de substitution	non	non	non	non
Les indicateurs de coûts en énergie	oui (sous forme énergétique)	non	Indéterminé	oui
Les indicateurs environnementaux	oui (rareté intégrant les coûts externes)	théorique: oui/empirique: indéterminé	Indéterminé	oui

Tableau 3-3 Bilan des différents indicateurs concernant leurs aptitudes à répondre à certaines problématiques.
Source : auteur

Pour éviter cela, nous avons créé des indicateurs dont les fondements et les apports diffèrent totalement (voir Tableau 3-3) :

- Les indicateurs de nature géologique bien que fort usités et *a priori* simples d'accès, sont utiles à condition d'appréhender correctement ce qu'ils révèlent. Les indicateurs géologiques ne fournissent de l'information que sur la rareté physique d'une ressource indépendamment de l'usage qu'en aurait l'homme (ressource en place). Par exemple on peut grâce à ces indicateurs voir que l'or est plus rare que le fer. Les indicateurs géologiques nous renseignent également sur la résultante de la lutte entre l'anthroposphère et la biosphère (évolution des découvertes, réserves, R/P). L'anthroposphère via le progrès technique et les forces économiques du marché cherchant à tirer un flux toujours plus important de la biosphère. Cependant, nous ne pouvons tirer de ces indicateurs des informations sur la rareté « relative » d'une ressource ni sur son épuisement.
- Les indicateurs économiques, en particulier le prix et la rente, fournissent au contraire des informations utiles sur la rareté relative d'une ressource naturelle. Ainsi, si la ressource s'épuise mais qu'il existe un substitut proche, le prix ou la rente intégreront ces données et n'indiqueront pas de hausse considérable de la rareté « relative » privée de la ressource. Toutefois, la théorie et la pratique ont montré que les indicateurs économiques ne nous permettent pas de conclure sur l'évolution de l'épuisement de la ressource. Sommes-nous plus proche ou moins proche de l'épuisement économique de la ressource ? Cette question est pour l'instant irrésolue puisque les indicateurs économiques empruntent des chemins non monotones ne nous permettant pas d'y discerner un trend temporel stable, à la hausse ou à la baisse. De plus, une partie de la rareté échappe à ces indicateurs économiques focalisés uniquement sur la rareté privée des ressources naturelles.
- Les indicateurs socio-environnementaux ont pour objet premier de corriger les externalités et de révéler la rareté sociale (intégrant les coûts sociaux) des ressources naturelles. Or les preuves empiriques confortent l'idée d'une rareté sociale s'accroissant au fil du temps de manière monotone, principalement du fait de la baisse qualitative des minerais. Les études d'analyse du cycle de vie centrées sur les externalités négatives de l'activité minière, constatent une hausse du coût social unitaire auquel s'ajoute une production toujours plus importante de ressources naturelles donc un coût social en hausse. Faute d'internalisation de l'ensemble des

coûts externes incorporés dans les ressources naturelles marchandes, le marché ne remplit pas correctement son rôle et les actions des agents économiques coordonnées par le prix privé des ressources sont alors sous-optimales. Cette dernière gamme d'indicateurs remplit donc deux fonctions : celle de nous indiquer le rapprochement de l'état d'épuisement économique des ressources (au travers du coût social) mais elle nous offre aussi la possibilité de remettre l'économie sur un chemin plus soutenable.

5 Application au cas des métaux rares : quel(s) indicateur(s) de la rareté ?

Au vue des méthodes disponibles actuellement, que peut-on alors conclure sur la disponibilité des métaux mineurs ? La construction des différents indicateurs abordés précédemment pour les métaux mineurs apparaît comme complexe à plusieurs titres :

- La plupart des métaux mineurs sont assujettis à une production en sous-produit d'autres grands métaux (métaux majeurs ou précieux). Cela signifie qu'ils ne possèdent pas dans la plupart des cas, de coûts identifiables. Les coûts associés à la production jointe demeurent en effet, dans la majorité des situations, attribués en totalité au coût de production du métal majeur. L'une des méthodes envisagée par certains auteurs consiste à réattribuer les coûts joints en fonction de la valeur des métaux mineurs dans la valeur totale générée (Mudd et Diesendorf, 2008). Une autre option passe par l'utilisation d'un prorata basé sur le poids du métal produit dans le poids total des métaux extraits (Farrell, 2009). La première méthode alourdit le bilan des métaux précieux tandis que la seconde revient à déplacer la majeure partie des coûts sur les métaux de base (UNEP, 2013). Une troisième option décrite par Rankin (2011) propose d'attribuer les coûts joints au prorata du volume ou du contenu énergétique de chaque métal.
- Contrairement aux autres métaux majeurs ou précieux, les métaux mineurs ne bénéficient pas de marchés organisés ni de données statistiques importantes publiques. Cet obstacle rend difficile voire impossible la construction d'une grande partie des indicateurs.

Dans ce contexte, nous avons essayé de calculer un ensemble d'indicateur de rareté pour deux métaux mineurs en pleine expansion : le lithium et l'indium.

5.1 Le cas du lithium

Le lithium est appelé à devenir une pierre de voute de la transition énergétique par son usage généralisé dans les technologies de stockage de l'énergie. Sa production ne dépassait pas 600 tonnes en 1950 alors qu'elle atteint aujourd'hui près de 37 kt. Certains secteurs (comme les batteries) faisant usage du lithium, bénéficient d'une croissance de près de 20% par an tandis que la demande générale en lithium a crû ces dernières années d'environ 8% par an. Comment évoluent les indicateurs de rareté et d'épuisement suite à ces tendances ?

Les indicateurs géologiques tels que représentés sur la Figure 3-13 ne semblent pas converger dans leurs conclusions. Le R/P a progressé très fortement suite à la révision des réserves par l'USGS en 2009 (passant de 150 à près de 400 ans d'années de production). Le constat est considérablement différent lorsqu'on prend en compte la croissance de la production dans le calcul du R/P (on parle alors de R/P exponentiel). Dans cette situation l'accroissement des réserves n'a que peu modifié l'indicateur du fait de l'évolution quasi similaire de la production.

Concernant les indicateurs économiques nous ne disposons que d'informations sur l'évolution du prix de la ressource. Le prix nominal de la ressource nécessite d'être déflaté pour établir un jugement sur l'évolution du prix réel de la ressource. La Figure 3-14 montre l'évolution du prix réel selon plusieurs déflateurs. Les déflateurs ne mesurent pas l'inflation de la même manière ce qui explique les différentes évolutions observables pour le prix réel. Si nous corrigeons les déflateurs du biais d'inflation mis en avant par Svedberg et Tilton (2006) nous obtenons là encore des résultats divergents (Figure 3-15). Sur le fond, les indicateurs montrent une même évolution à la baisse du prix réel du lithium jusqu'au milieu des années 60. Après cette date, les résultats sur le trend (à la baisse, stable, à la hausse) diffèrent selon le déflateur choisis. La chute du prix survenue après 2000 manifeste la présence d'un pouvoir de marché des firmes SQM et Chemetall (produisant à partir de saumures depuis 97-98). La nouvelle hausse au milieu des années 2000 témoigne de la croissance de la consommation chinoise. Si l'on observe le trend de long terme et que l'on met à part le début des années 2000, les indicateurs économiques de rareté semblent relativement stables depuis 1970 puisque l'évolution est contenue dans la fourchette 4000-7000 \$ (2009)/t. En 2012, le prix de la tonne de carbonate de lithium oscillait encore dans cette gamme de prix (4000-5000 \$/t). Il n'existe

donc pas de signe révélateur d'un accroissement ou au contraire d'une diminution de la rareté relative privée du lithium.

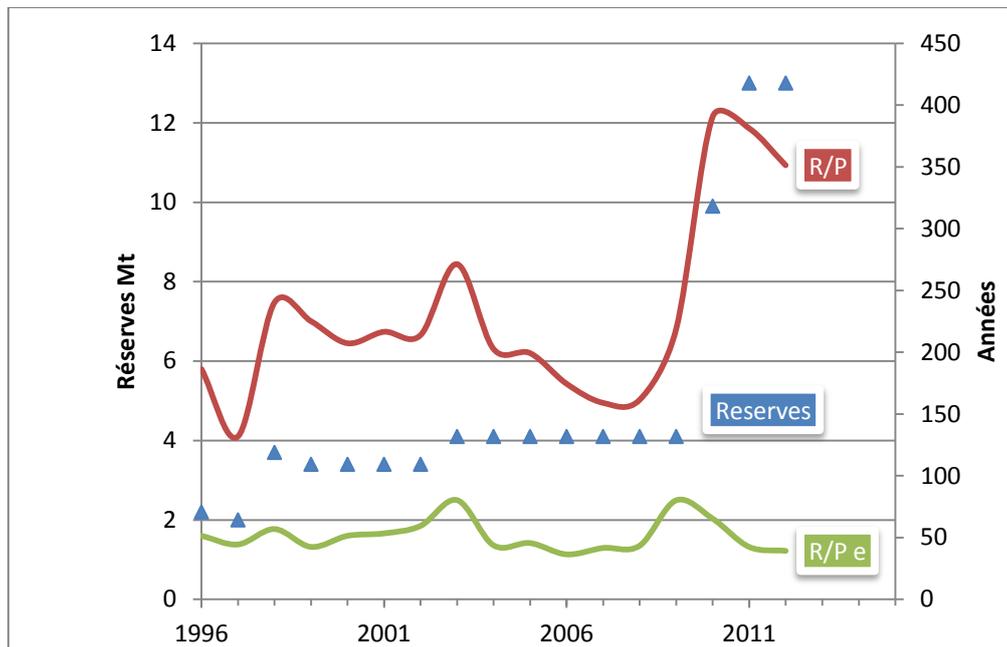


Figure 3-13 Evolution des réserves, du R/P et R/P exponentiel pour le lithium. Source : USGS, calculs de l'auteur

Concernant l'indicateur de la rente, les différentes méthodologies (méthode d'El Safary et valeur actuelle nette des revenus futurs⁸⁷) appliquées à plusieurs gisements nous fournissent des valeurs oscillant entre 200 et 1800 \$/t de carbonate de lithium avec une moyenne proche de 1000\$/t (Figure 3-16). Nous ne disposons pas de données suffisantes pour évaluer l'évolution de ces rentes. Le lithium connaît une situation paradoxale depuis une vingtaine d'années qui se manifeste par le remplacement progressif des gisements de pegmatites par des gisements d'extraction de lithium à partir des saumures. Les gisements de pegmatites dont la concentration en lithium est pourtant souvent 5 à 15 fois supérieure aux gisements de saumures deviennent progressivement les producteurs marginaux (Yaksic et Tilton, 2009). La baisse de la teneur se traduit alors par une baisse des coûts économiques privés. En réalité cette baisse est rendue possible par une différence de technologie de production du lithium. L'extraction du lithium à partir des saumures fait grand usage de l'énergie solaire pour augmenter la concentration du lithium. La baisse du coût économique privé repose donc ici sur un accroissement du coût environnemental énergétique et une baisse du coût énergétique humain.

⁸⁷ Les méthodes sont définies et développées dans l'encadré 3-1. Les données ont été tirées de différents rapports publics et notes publiés par les compagnies.

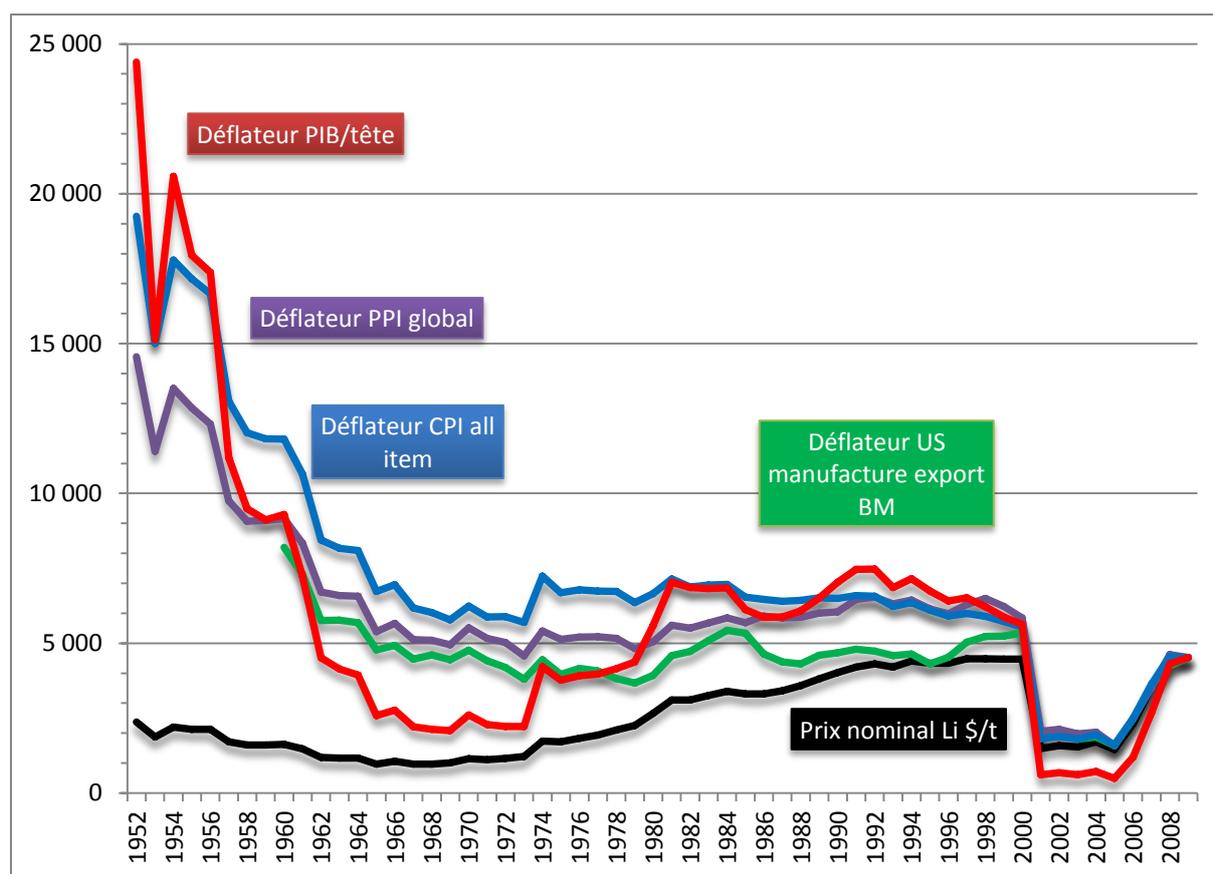


Figure 3-14 Evolution du prix réel du lithium selon différents déflateurs. Source : USGS, calculs de l'auteur

Concernant les indicateurs environnementaux, le lithium ne bénéficie pas d'analyse du cycle de vie dans la durée, ce qui repousse tout constat sur l'accroissement des externalités négatives et la destruction d'aménités naturelles suite à l'épuisement des gisements de lithium. Le coût environnemental du lithium demeure encore relativement méconnu. Le coût externe lié au CO₂ attaché au lithium subit de grandes fluctuations selon qu'on considère que le lithium est extrait de saumure, de pegmatite, ou de l'eau de mer. Aussi, des conditions favorables ou défavorables d'exploitation peuvent avoir une grande influence sur le coût environnemental final. Ainsi, l'analyse du cycle de vie de Schmidt (2012) consacrée au lithium, table sur une empreinte carbone de 21,1 kg de CO₂ par kg de lithium. Plus exhaustive, l'étude de Stamp et al. (2012) évoque un coût pouvant varier d'environ 11 kg de CO₂ (pegmatites dans des conditions favorables et défavorables, et saumures dans des conditions favorables) à 429 kg CO₂ (saumures dans des conditions défavorables) voire 3,9 tonnes de CO₂ par kg de lithium (lithium extrait de l'eau de mer dans des conditions défavorables). Rappelons que le coût en CO₂ n'est qu'une partie du coût externe lié à l'extraction du lithium. Par exemple, le lithium extrait des saumures pourrait en cas de conditions défavorables voir son coût environnemental, ici mesuré par l'ecoindicateur 99,

multiplié par 25. L'écoindicateur est un indicateur d'analyse de cycle de vie qui prend en compte divers critères comme la surface terrestre occupée, l'acidification ou l'eutrophisation des milieux, les gaz nocifs à la couche d'ozone... Bien entendu, le coût environnemental comme exprimé par l'écoindicateur 99 ne reflète pas le coût social car son unité de mesure n'est pas monétaire. Mais il permet d'observer différents types de dégâts causés dans l'environnement grâce à plusieurs critères exprimés dans des unités physiques.

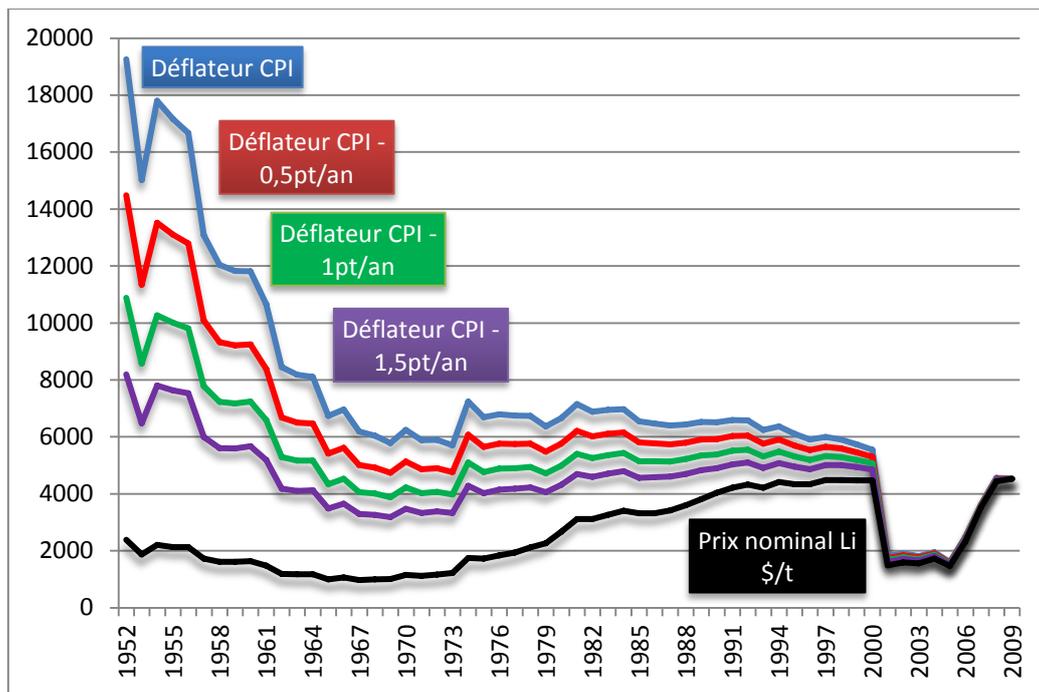


Figure 3-15 Correction d'un déflateur de 0,5, 1 et 1,5 pt par an et impact sur le prix réel. Source : USGS, calculs de l'auteur

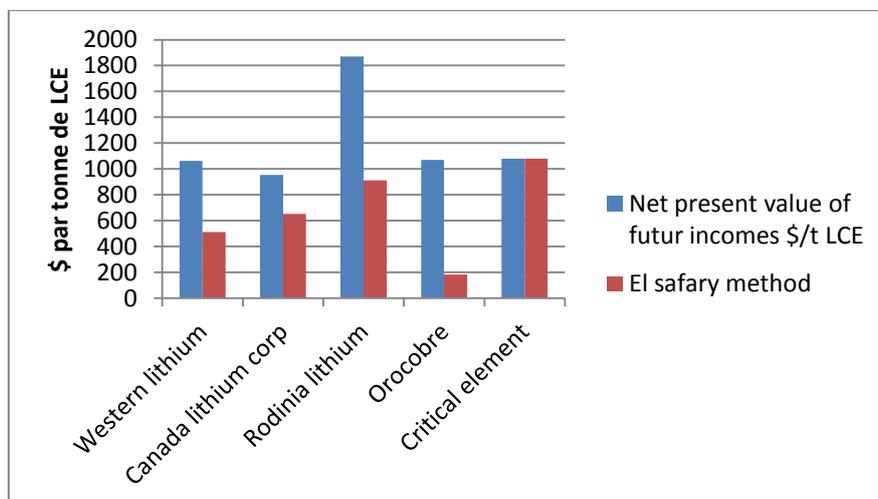


Figure 3-16 Calcul de la rente attachée au lithium via deux méthodes (\$ par tonne de lithium carbonate équivalent). Source : Rapports publics des compagnies minières, calculs de l'auteur

5.2 Le cas de l'indium

Si l'indium a connu ses premières applications durant la première guerre mondiale, sa consommation n'a réellement émergé qu'à partir des années 1980 avec le développement de l'ITO (indium-Tin-Oxyde). Il est maintenant présent dans une variété d'applications de microélectronique et de semi-conducteurs. On le trouve ainsi dans les panneaux photovoltaïques de deuxième génération (CIGS). Les réserves d'indium connaissent des niveaux relatifs à la production plus faibles en niveau que les autres métaux (USGS). Le R/P a varié par exemple dans la fourchette 5-18 sur les dix dernières années (Figure 3-17). Ce niveau très faible du R/P s'explique probablement par le fait que les déclarations de réserves faites par les sociétés minières, sont révisées très rarement. En 2009, l'USGS a d'ailleurs cessé de publier des évaluations portant sur les réserves d'indium. L'indium est présent principalement dans les gisements de zinc mais aussi de plomb et de cuivre. Toutefois, les concentrations de l'indium dans les minerais de zinc connaissent d'amples fluctuations (de 1 à 800 ppm) et il est difficile d'en déterminer les quantités récupérables dans les réserves associées au zinc.

Concernant les indicateurs économiques de la rareté, la trajectoire du prix réel de l'indium est symptomatique des fluctuations propres aux micromarchés des métaux rares. Les tailles de ces marchés étant très réduites, la moindre innovation accroissant l'usage ou au contraire substituant l'usage des métaux rares entraîne une grande fluctuation de la demande et donc du prix (Figure 3-18). Par exemple, l'indium peut être substitué par l'antimoine dans les usages de l'ITO ou par le gallium dans les cellules solaires. Il est par conséquent difficile de déterminer à partir du prix réel si l'indium est une ressource plus ou moins disponible économiquement.

Enfin, les indicateurs socio-environnementaux sur l'indium sont encore très imparfaits mais commencent à se développer afin d'évaluer l'impact environnemental de la production issue des métaux rares employés dans les panneaux photovoltaïques à couches minces (Fthenakis et al., 2009). L'étude de Schmidt (2012) évoque une empreinte carbone de 154 kg de CO₂ par kg d'indium sans toutefois préciser sa méthode d'allocation des émissions sur les productions jointes. Au contraire, la méthode d'allocation des émissions de CO₂ jointes de Fthenakis et al (2009) repose sur la valeur économique mais ne prend en compte que le prix de la ressource et non pas la valeur totale générée par l'indium dans les recettes totales. Ce biais conduit à

allouer l'essentielle des émissions de CO2 à l'indium alors qu'il ne représente qu'une part mineure des recettes de l'entreprise minière.

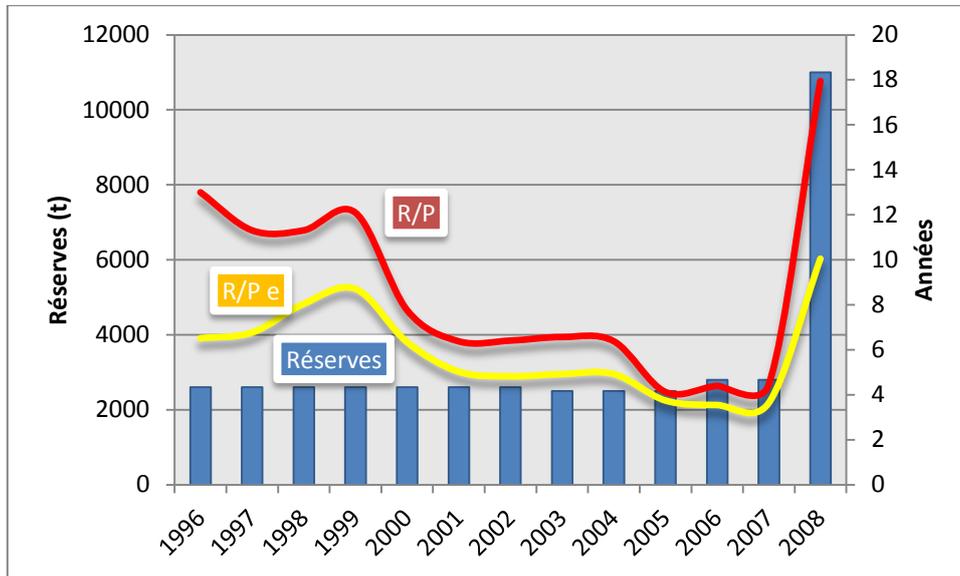


Figure 3-17 Evolution des réserves, du R/P et R/P exponentielle pour l'indium. Source : USGS, calculs de l'auteur

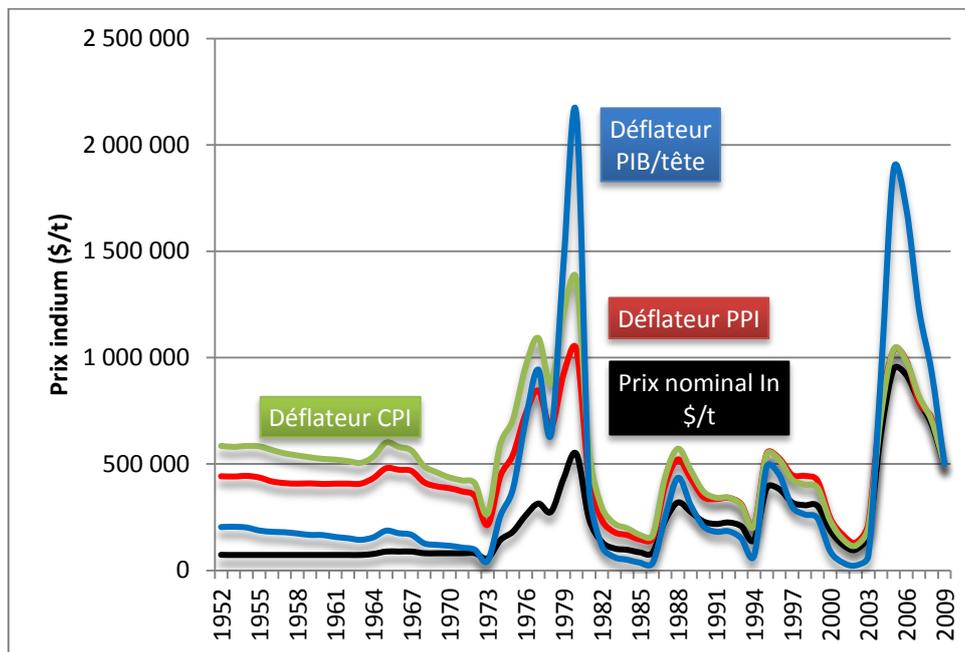


Figure 3-18 Evolution du prix réel de l'indium selon différents déflateurs. Source : USGS, calculs de l'auteur

En conclusion, les données disponibles sur les métaux rares sont très lacunaires et ne permettent pas de mettre en évidence une baisse de la disponibilité de ces ressources minérales. Néanmoins, ces ressources génèrent comme d'autres métaux d'importantes externalités négatives mais aussi la dégradation d'un ensemble de biens communs entraînant

des pertes de bien-être non monétarisées. Il s'ensuit une sous-estimation du prix de la ressource attachée à une surconsommation de celle-ci et par conséquent à un épuisement trop rapide de ses réserves. Dans quelle mesure ?

Cette question est essentielle parce que nous faisons face à une grande incertitude pour y répondre. Manque de données, de méthodologies communes, mais également nombreuses incertitudes affectant le coût optimal du CO2 et surtout l'élasticité prix de la demande des petits métaux. La Figure 3-19 propose une idée de la surestimation de la demande pour le lithium pour différentes valeurs du CO2 et de l'élasticité prix de la demande. Par exemple si nous supposons une élasticité prix unitaire de -0,5% de la demande en lithium et que l'intégration du CO2 fait monter le prix du lithium de 3,14% (sous l'hypothèse d'un prix du CO2 de 35\$/t), la demande devrait baisser (toutes choses égales par ailleurs) de 1,57%. N'oublions pas que ces valeurs – quelles que soient les hypothèses retenues pour le prix du carbone et l'élasticité prix de la demande - ne représentent que des valeurs minimales car on intègre ici qu'une partie des coûts externes (le coût du CO2).

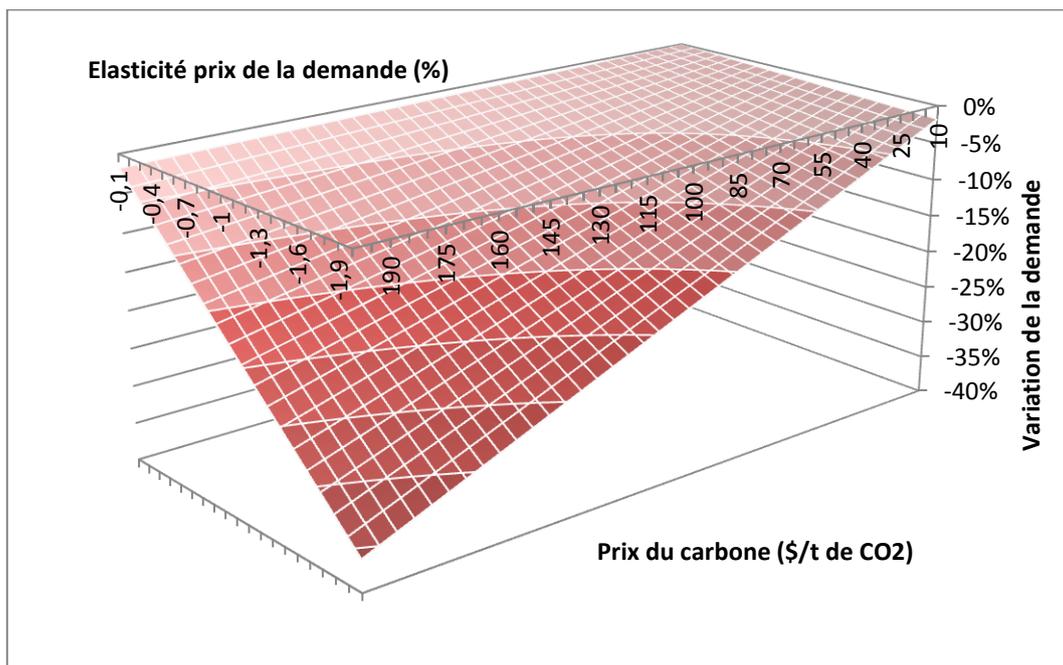


Figure 3-19 Baisse de la demande en lithium résultant d'une intégration d'une partie des coûts sociaux. Source : *calculs de l'auteur*

6 Conclusion

Nous avons pu montrer au travers de ce chapitre l'intérêt et les limites des différents indicateurs centrés sur la rareté des ressources naturelles. L'usage et les interprétations que l'on peut tirer de ces indicateurs varient selon les types d'indicateurs (géologiques, économiques, physiques et socio-environnementaux) et ont été précisés grâce à l'apport des différentes études académiques. Les données nécessaires à la construction de l'ensemble de ces indicateurs pour les métaux rares sont relativement restreintes et butent souvent sur la nature de sous-produit ou coproduit de ces métaux. Nous avons montré cependant que les indicateurs géologiques et économiques ne permettent pas de tirer des conclusions sur la hausse ou la baisse de la disponibilité économique de ces ressources. En revanche, les indicateurs socio-environnementaux nous font penser que nous surconsomons ces ressources et les épuisons trop rapidement du fait d'un prix trop faible (n'intégrant pas les coûts externes). La mesure de l'ampleur de cette surconsommation réclame davantage de données, en particulier sur les estimations des élasticités prix des demandes des métaux rares et sur la valorisation de l'ensemble des coûts externes.

Au final, cette première partie s'est attachée à dégager les tendances mais aussi les principales conclusions établies par la littérature sur l'épuisement et la rareté des ressources naturelles. Nous avons également pu souligner quels étaient les principaux mécanismes affectant l'épuisement d'une ressource naturelle non renouvelable et quels usages nous pouvions faire de certains indicateurs de rareté des ressources naturelles.

Cette première partie a été aussi l'occasion de clarifier notre sujet d'étude en proposant une définition plus explicite et plus robuste de ce que pourrait être les métaux rares. Ces métaux partagent, en effet, différents points communs, à savoir : la présence d'une production en tant que sous-produit majoritaire, une forte concentration géographique de la production souvent doublée d'un risque géopolitique, un très faible recyclage généré par une absence d'incitations économiques et réglementaires, des micromarchés associés à une forte volatilité de la production et de la demande, une incertitude prégnante causée par une absence quasi-systématique de marchés à terme, et un manque d'indicateurs sur l'épuisement de ces métaux.

La seconde partie vise à démontrer comment les spécificités de ces métaux rares pourraient représenter des obstacles à la mise en place de la transition énergétique. C'est pourquoi nous analyserons tout d'abord dans le chapitre 4, comment la production en sous-produit des

métaux rares peut représenter un risque potentiel pour le développement des énergies vertes. Nous verrons ensuite dans le chapitre 5 si l'absence de marché à terme pour ces métaux peut aussi comporter des risques pour la transition énergétique. Enfin, nous verrons dans un chapitre 6, dans quelle mesure l'épuisement des métaux peut affecter le secteur des énergies vertes.

<p style="text-align: center;"><u>PARTIE II CONTRAINTES AFFECTANT LA DISPONIBILITE</u></p> <p style="text-align: center;"><u>ECONOMIQUE DES METAUX RARES</u></p>
--

Nous avons vu dans la première partie que les spécificités attachées aux métaux rares déterminées dans le chapitre 1 suscitent de nouvelles interrogations qu'il convient d'étudier. Ces nouvelles questions liées aux caractéristiques des métaux rares (la production en sous-produit, l'absence de marché à terme et l'épuisement) feront l'objet d'une analyse particulière dans cette seconde partie pour évaluer si elles peuvent représenter une contrainte pour l'essor de la transition énergétique. Cette seconde partie mobilisera aussi des notions et des arguments ayant trait à l'épuisement et à la disponibilité économique de long terme des ressources naturelles expliquées et dégagées dans les chapitres 2 et 3 de la première partie.

Tout d'abord, nous aborderons dans le quatrième chapitre de cette thèse les contraintes amenées par la production en sous-produit des métaux rares. Nous montrerons grâce à un modèle théorique d'équilibre statique que cela implique une élasticité prix de la production jointe aux prix de ces métaux faible voire nulle. Néanmoins, nous verrons également qu'il subsiste dans la réalité des marges potentielles de production qui peuvent permettre au producteur d'adapter jusqu'à un certain point sa production de sous-produits (les métaux rares) aux fluctuations de leur demande. Pour apprécier, la possibilité d'une saturation de cette marge potentielle de production, nous développerons, à titre illustratif, un scénario prospectif nous permettant d'évaluer si la croissance prévue du secteur photovoltaïque pourrait saturer la contrainte de sous-produit de différents métaux rares (gallium, indium, tellure).

Pour continuer, le cinquième chapitre explorera dans un premier temps les principaux facteurs permettant d'expliquer l'absence de marché organisé d'une ressource naturelle. Afin d'approfondir l'impact de ces facteurs, nous emploierons un modèle logit reliant la probabilité pour un métal de détenir un marché à terme aux niveaux de deux variables proxy (le prix et la production), reflétant elles-mêmes de manière indirecte des variables plus nombreuses. En ce qui concerne les conséquences liées à cette absence de marché à terme, nous parcourons les résultats des principaux modèles économiques (Heal (1975), Dasgupta et Heal (1979) et Lasserre (1991)) s'étant penchés sur cette question. Il ressort que ces modèles suggèrent différents types de chemins d'exploitation des ressources naturelles selon les hypothèses faites

sur la forme des anticipations des agents économiques. Nous compléterons cette analyse par une application économétrique visant à déterminer si les comportements des marchés du molybdène et du cobalt (deux métaux rares) ont été modifiés suite à l'introduction de leurs marchés *futures* en 2010. Nous montrerons que les métaux rares (sans marché *futures*) sont caractérisés par une volatilité intrinsèque de leur prix plus élevée en comparaison des autres métaux de base, tandis que le molybdène et le cobalt ont vu la volatilité de leur prix baisser suite à la création de leurs marchés *futures*. Nous apporterons aussi la preuve que les prix de marchés guident les prix reportés lorsque les deux systèmes de prix coexistent.

Enfin, le sixième chapitre proposera une évaluation de l'épuisement des métaux rares sous l'angle de l'*Energy Return On Investment (EROI)*, un indicateur dérivant de l'approche biophysique. Si les études de criticité centrées sur la disponibilité des métaux rares dans le cadre du développement des énergies renouvelables sont de plus en plus nombreuses, elles comportent plusieurs types de limites (géographiques, temporelles, sectorielles, épuisement quantitatif). Pour mieux cerner les facteurs concourant à cet épuisement quantitatif, nous décomposerons la demande en métaux (nature et quantité) du secteur énergétique comme la résultante de plusieurs éléments (demande en énergie, mix énergétique, mix technologique, intensité en métaux des technologies) pouvant représenter différents niveaux de substitution. Pour dépasser les limites géographiques, temporelles et sectorielles des études de criticité, nous établirons ensuite un scénario prospectif de la demande future de lithium et de cobalt afin de déterminer les quantités de réserves nécessaires à prouver pour maintenir le ratio réserves sur production (R/P) de ces ressources d'ici à 2050. Toutefois, une estimation des ressources en place de lithium et de cobalt nous amène à écarter l'épuisement quantitatif de ces ressources et à considérer davantage l'épuisement qualitatif des métaux (non pris en compte dans ces études) pour estimer l'épuisement économique. C'est donc dans cette optique, que nous nous pencherons dans une seconde section sur la dégradation qualitative des minerais et de l'énergie depuis le début du XX^{ème} siècle. Nous démontrerons ensuite le renforcement des liaisons existantes entre le secteur des métaux et de l'énergie du fait de cet épuisement qualitatif. Finalement, nous évaluerons grâce à l'EROI, la soutenabilité de la transition énergétique à long terme grâce à la prise en compte du lien de rétroaction positive unissant le secteur des métaux et le secteur de l'énergie (compte tenu de l'épuisement qualitatif de ces derniers).

CHAPITRE 4 : CONTRAINTE DE PRODUCTION LIEE A L'EXTRACTION EN SOUS-PRODUIT DES METAUX RARES⁸⁸

« C'est crucial de comprendre qu'il ne s'agit pas de problèmes mais bien de symptômes. Si vous avez un cancer, vous pouvez avoir mal à la tête ou de la fièvre mais vous ne vous imaginez pas que si vous prenez de l'aspirine pour éliminer la fièvre, le cancer disparaîtra.

Les gens traitent ces questions comme s'il s'agissait de problèmes qu'il suffit de résoudre pour que tout aille bien. Mais en réalité, si vous résolvez le problème à un endroit, la pression va se déplacer ailleurs. Et le changement ne passera pas par la technologie mais par des modifications sociales et culturelles. »

Dennis Meadows, Terraeco, Volume 38, 2012.

« On voit que le débat avec les progressistes, seuls adversaires fondamentaux des « irréversibilistes », porte sur ce qui, du capital naturel, est substituable ou non. C'est donc un débat sur le potentiel des sciences et des techniques et, plus généralement, sur la capacité de l'humanité à maîtriser la nature – y compris et surtout en s'adaptant aux changements de cette dernière -, ce qu'elle a fait jusqu'ici. »

Pierre-Noël Giraud, *Ressources naturelles et solidarité entre générations*, Etudes, 2008.

1 Introduction

Nous avons vu dans le chapitre 1 que le développement des nouvelles technologies de l'énergie, suite à la lutte contre le réchauffement climatique et à l'épuisement des hydrocarbures, réclame une gamme de métaux de plus en plus élargie comparée aux technologies traditionnelles. Le recours à une palette plus diversifiée de métaux diminue par ailleurs le risque de rupture d'approvisionnement grâce à la diversification des matériaux nécessaires. Toutefois ces nouvelles technologies, souvent qualifiées de « propres » ou de « vertes » (éolien, photovoltaïque, CCS...) au regard de la source d'énergie utilisée,

⁸⁸ Une partie de ce chapitre a été publiée sous la référence « Byproduct production of minor metals: threat or opportunity for the development of clean technologies? The PV sector as an illustration », *Resources Policy*, 38, 373-383.

requièrent davantage de métaux ferreux et métaux de base comme le cuivre mais également des quantités non négligeables de métaux rares (JRC, 2011). Un premier cadrage est d'ordre géopolitique ou stratégique. Une part élevée de ces métaux rares provient de Chine, un Etat ayant déjà pratiqué par le passé des politiques commerciales interdites par l'OMC (quotas à l'exportation), notamment pour l'indium et les terres rares. Cependant, au-delà de la part relative de la Chine dans la production des métaux, c'est la part de la croissance de la demande dédiée à la Chine – variant entre 70% et quasi 100% de la demande additionnelle pour les métaux de base – qui semble la plus préoccupante (Humphrey, 2010). Une attention toute particulière est donc requise pour analyser les intérêts et le comportement de ce pays qui totalise à lui seul près de 20% de la population mondiale et 10% du PIB nominal mondial.

Un deuxième cadrage concerne le mode de production des métaux rares. Le statut de sous-produit voire au mieux de coproduit, demeure encore aujourd'hui l'un des traits caractéristiques différenciant les métaux rares des métaux de base ou des métaux précieux (or, argent, groupe des platinoïdes). En d'autres termes, les concentrations très faibles de ces métaux rares associées à leurs valorisations économiques actuelles ne permettent pas une mise en production isolée comme on pourrait le faire pour un gisement de cuivre ou d'or. L'occurrence dans la croûte terrestre de ces métaux rares est faible : comme le précise Taylor et Mclenon (1985), la concentration moyenne dans la croûte terrestre de l'indium ne dépasse pas 0,05 ppm, une concentration analogue à l'argent, tandis que la présence du tellure est à peu près du niveau de l'or (0,001 ppm). A l'opposé, le gallium fait partie des métaux rares les plus abondants avec une occurrence moyenne de près de 17 ppm dans la croûte terrestre.

Nous distinguons deux types de production possibles pour cette variété de métaux rares :

- Le développement de l'extraction jointe de plusieurs de ces métaux rares en même temps afin de pouvoir couvrir la totalité du coût joint plus les coûts spécifiques à chacun. Les métaux seront qualifiés de coproduit et chacun assure la rentabilité du projet. C'est le cas des gisements de terres rares ou de la production de cobalt simultanément au cuivre et au nickel.
- Le développement de l'extraction d'un métal mineur en parallèle à l'extraction d'un autre métal (produit primaire) assurant déjà la rentabilité du projet. Le métal mineur est alors sous-produit du produit primaire et il n'apporte qu'une plus-value supplémentaire au projet minier. C'est le cas de la plupart des métaux rares utilisés dans les hautes technologies.

Tandis que le coproduit dirige en partie la détermination de la quantité optimale à produire, le sous-produit n'agit pas sur la quantité optimale de minerais à produire. En conséquence, si les demandes du sous-produit et du produit primaire n'évoluent pas dans le même sens ou dans les mêmes ordres de grandeur, le sous-produit va alors être rationné ou au contraire surproduit.

Jusqu'alors les relations entre sous-produits et leur produits primaires dans le domaine minier ont fait l'objet d'assez peu d'études (Pindyck, 1982 ; Campbell, 1985 ; Verhoef et al., 2004 ; Naumov et Grinberg, 2009 ; Brooks, 1965). Ceci peut s'expliquer par la place encore marginale occupée hier par les métaux rares dans nos économies et par la faible disponibilité d'informations fiables sur les prix et les productions. La situation a en revanche changé avec le développement des nouvelles technologies de l'information et des communications et plus récemment de l'énergie qui appelle de grandes quantités de ces métaux rares (voir chapitre 1). Ainsi de nombreuses questions se sont cristallisées sur la position de sous-produit occupée par la plupart des métaux rares comme en témoigne le rapport de la commission européenne (2010) et du DOE (2011). Il s'agirait de qualifier si cette position de sous-produit constitue une contrainte réelle pour la disponibilité de ces métaux et donc une menace pour le développement des nouvelles technologies de l'énergie ou si au contraire ce statut est à considérer comme une opportunité tant en termes d'économie de coûts, que d'externalités environnementales. Par ailleurs, on peut se demander si l'abandon de la gestion de ces métaux rares aux mécanismes de marché est totalement approprié en cas de saturation de la contrainte.

L'étude est menée sur plusieurs relations entre des sous-produits et leur produit primaire. L'étude se base sur des données annuelles sur une échéance d'au moins 40 ans fournies par l'USGS⁸⁹. Nous obtenons de cette manière les productions attachées au sous-produit et à son produit primaire.

Six relations sont envisagées et font donc l'objet de tests statistiques :

- La relation entre le germanium et le zinc.
- La relation entre l'indium et le zinc.
- La relation entre le gallium et l'aluminium.
- La relation entre le tellure et le cuivre.

⁸⁹ <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>.

- La relation entre le sélénium et le cuivre.
- La relation entre le molybdène et le cuivre.

Depuis le milieu du vingtième siècle, les usages des métaux rares se sont considérablement élargis, voici les principales consommations des métaux de notre panel.

- Le gallium est utilisé comme semi-conducteur, dans les circuits imprimés, les LED, les lasers et les cellules solaires (CIGS).
- L'indium entre essentiellement dans la fabrication d'écran plat et de panneaux photovoltaïques à couches minces (CIGS).
- Le germanium est indispensable à la construction de fibre optique, à des technologies optiques (lunettes à vision nocturne) et sert comme catalyseur polymère.
- Les principaux secteurs utilisateurs de tellure sont la métallurgie, la chimie, la pharmacie, et l'électronique. Il permet aussi la fabrication de photovoltaïque à couches minces (CdTe).
- Le sélénium est principalement utilisé pour les photocopieurs, les imprimantes, et le photovoltaïque à couches minces (CIGS).
- Le molybdène⁹⁰ est souvent employé dans des alliages et des superalliages, mais aussi comme catalyseur pétrolier et dans des pièces de moteur de véhicule.

Afin d'analyser ces enjeux et répondre aux questions sous-jacentes, nous procédons comme suit. Dans un premier temps, nous analyserons la teneur de la relation entre un sous-produit et un coproduit. Nous verrons que le statut de sous-produit dépend bien évidemment de la valorisation économique du sous-produit et de sa concentration. Cette première partie aura pour objectif de mettre en évidence l'évolution du comportement du producteur quant à la quantité optimale à extraire suite à une évolution du rapport des prix du sous-produit et de son produit primaire. Dans un second temps, nous allons tenter de distinguer la présence ou non d'un lien empirique entre la production du sous-produit et celle de son produit primaire. Un lien de cointégration entre les deux productions impliquerait que la contrainte de sous-produit est saturée et donc que la disponibilité du sous-produit pourrait être mise en péril si sa demande venait à augmenter trop rapidement. Au contraire, si la production du sous-produit

⁹⁰ Le lecteur remarquera que la production du molybdène, bien que dépendant à 80% de la production du cuivre en sous-produit, bénéficie également d'une production plus mineure en tant que produit primaire.

évolue peu en rapport avec la production du produit primaire cela pourrait indiquer une marge supplémentaire (définie ici comme une marge potentielle⁹¹) existante avant la saturation de la contrainte de production. Plusieurs méthodes statistiques (test du signe, test de cointégration) sont mises en œuvre dans ce but. Nous estimons ensuite pour différents métaux cette marge potentielle et vérifions si la croissance du secteur des panneaux photovoltaïques à couches minces pourrait absorber cette marge et buter contre la contrainte de sous-produit.

2 Analyse du lien théorique entre un sous-produit et son produit primaire

2.1 Considérations théoriques découlant de la production en sous-produit

Une liaison entre un sous-produit et un produit primaire implique que la production du sous-produit évolue en fonction des besoins de la demande du produit primaire (Figure 4-1). Sur le premier graphique (quadrant A) on a représenté l'équilibre Qa^* entre l'offre et la demande du produit primaire (a) tandis que le second graphique (quadrant B) montre l'équilibre entre l'offre rigide du sous-produit (s) et sa demande Qs^* . Comme le producteur ne tient pas compte du prix du sous-produit qui n'assure pas la rentabilité du sous-produit, l'élasticité de l'offre de sous-produit Os est nulle.

⁹¹ La marge potentielle représente ici une quantité de sous-produit non valorisée par le producteur lorsqu'il extrait une quantité de minerais pour son contenu en produit primaire.

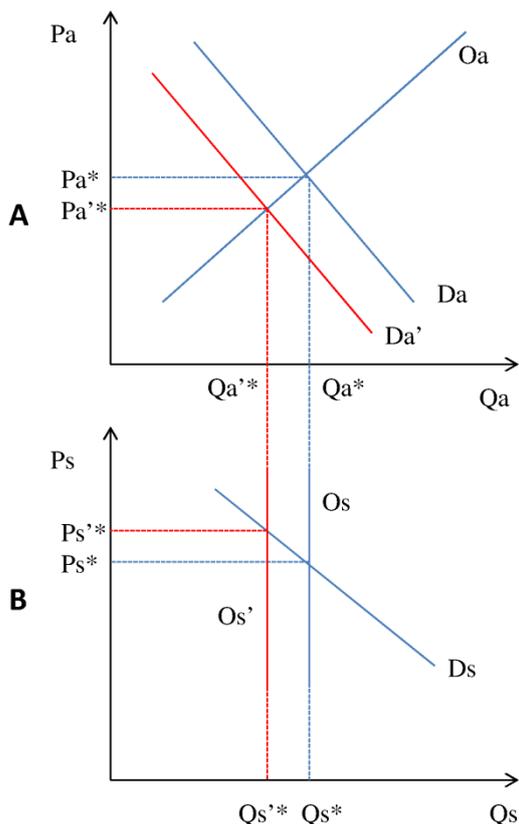


Figure 1. Relation entre marché du produit primaire et du sous produit

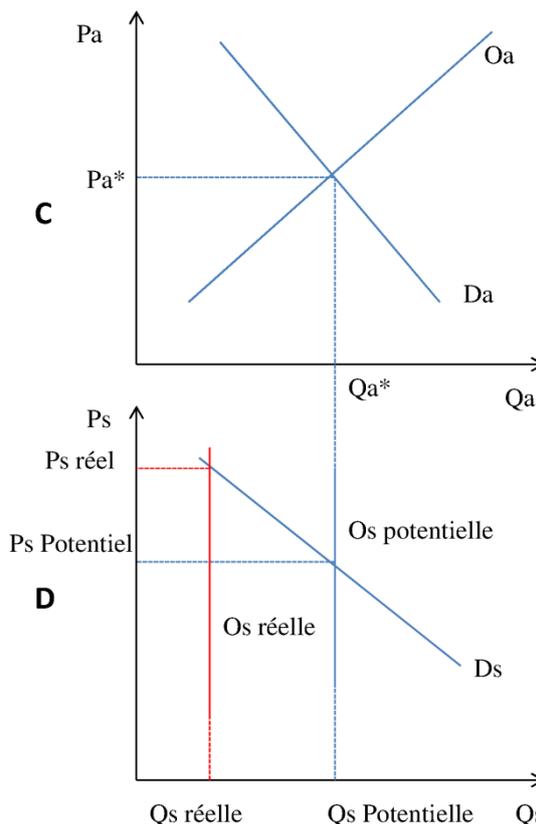


Figure 3. Offre réelle et offre potentielle de sous produit

Figure 4-1 Représentation des équilibres possibles entre les marchés de produits primaires et sous-produits. Source : auteur

Pourquoi le producteur ne réagit-t-il pas à des variations du prix du sous-produit ? Hagelüken (2011, p.363) propose une réponse à cette problématique:

« Since the byproduct (“minor metal”) is only a very small fraction of the carrier metal, here the usual market mechanisms do not work. An increasing demand will certainly lead to an increasing price of the by-product metal, but as long as the demand of the major metal does not rise correspondingly, mining companies will not produce more, because this would erode the major metal’s price. In this respect, the supply of byproduct metals is price-inelastic, even a “tenfold increase” in its price could usually not compensate the negative impact on total revenues when there is oversupply of the major metal ».

Qa^* et Qs^* varient conjointement, leur rapport représentant le rapport moyen des taux de concentration des deux métaux dans les gisements. A l’instar de deux wagons de montagnes russes arrimés l’un à l’autre, le second wagon de sous-produit est obligé de reproduire les

montées et les chutes du wagon de produit primaire le précédant. Le crochet reliant les deux wagons représente la liaison contrainte entre sous-produit et produit primaire. Ces chutes et montées sont des variations, et nous vérifierons par la suite si elles sont coordonnées empiriquement. Le deuxième enseignement de ce graphique repose sur la mise en lumière de la relation de dépendance de la production du sous-produit vis-à-vis du marché du produit primaire. La quantité produite Q_s^* et donc le prix d'équilibre P_s^* sont complètement dépendants des variations de la demande du produit primaire. Si celle-ci se contracte, l'offre de produit primaire va se réduire et entraîner du même coup la production de sous-produit (Q_s^* à $Q_s'^*$) entraînant, toutes choses égales par ailleurs, la hausse du prix du sous-produit. Nous remarquons d'ailleurs que les déséquilibres vont dépendre particulièrement de la cohésion des changements de demande du produit primaire et du sous-produit. Ceci est analysé dans l'article de Campbell (1985), Naumov et Grinberg (2009), et Brooks (1965). Plus les variations des demandes seront opposées ou différentes, plus le déséquilibre sur le marché du sous-produit sera important.

Une seconde conclusion à tirer de cette analyse repose sur l'absence de lien direct entre le prix d'un sous-produit et le prix de son produit primaire. Les prix des deux métaux n'ont aucune raison particulière d'évoluer systématiquement dans le même sens puisque ce sont les rapports d'équilibre entre les deux demandes qui vont déterminer l'évolution des prix sur les deux marchés. Cette absence de lien direct entre les prix des deux métaux n'exclut pas la possibilité d'une relation de cointégration pour d'autres motifs que la production jointe. On peut notamment penser à l'intégration des deux métaux dans la fabrication d'un bien ou service en forte croissance (comme par exemple le cobalt et le nickel dans les alliages haute température).

2.2 *Limites pratiques et réelles à la contrainte de sous-produit*

Le statut de sous-produit d'un petit métal peut évoluer avec le temps si jamais son prix venait à augmenter trop fortement. Arrivé à un certain stade, le prix sera tel que le métal pourrait devenir un coproduit voire un produit primaire et retrouver une certaine élasticité prix. Pour le démontrer nous nous appuyons sur le ratio de valorisation représenté par le rapport des prix (P_s/P_a) sur le rapport des concentrations (Q_a/Q_s). En effet, en supposant une contrainte de rapport entre Q_a^* et Q_s^* , nous pouvons démontrer qu'au fur et à mesure que le rapport des

prix (P_s/P_a) sur le rapport des concentrations (Q_a/Q_s) augmente, le producteur réagit alors de moins en moins à une modification de 1% du prix du produit primaire P_a tandis que sa réaction face à une hausse du prix de 1% du sous-produit P_s augmentera de plus en plus (voir Annexes 4.1). Plus précisément, pour des ratios faibles, le producteur réagit essentiellement aux modifications de la demande de a (P_a) mais peu ou pas aux changements de la demande de s (P_s). Au contraire quand le rapport approche l'unité, le producteur augmentera de la même manière la production jointe suite à une hausse de la demande de s ou de a : a et s sont alors coproduits (Figure 4-2).

Ces hypothèses restent cependant simplificatrices. Les prix des sous-produits n'ont pas suffisamment augmenté dans la réalité pour atteindre des ratios de valorisation proches de 1. Dans le cas du gallium, de l'indium ou du tellure par exemple, le ratio est largement inférieur à 0,1. Ces métaux ont donc par conséquent peu de chance de guider un jour la production de leur produit primaire car les augmentations de prix nécessaires seraient tout simplement trop importantes, et il n'existerait probablement plus aucune demande adressée à ces métaux à ces niveaux de prix. L'étude commanditée par la commission européenne (JRC, 2011) fournit quelques exemples des rapports de production entre ces sous-produits et leurs produits primaires pour certaines raffineries de métaux (Tableau 4-1). L'inverse des ratios de valorisation, s'étalant de 25 à 1000, nous procure l'amplitude de l'augmentation du prix nécessaire du sous-produit pour qu'il bascule vers un statut de coproduit voire de produit primaire. Par exemple pour le gallium, le Tableau 4-1 nous montre que le ratio de valorisation est égal à 0,008 (248/30000), ce qui signifie que le prix du gallium devrait être multiplié par 125 pour générer autant de recette par tonne de minerais extrait que l'aluminium (son produit primaire). Bien entendu, les raffineries de métaux actuelles ne sont pas optimisées pour la récupération des sous-produits ; nous pourrions en réalité récupérer davantage de sous-produit par tonne de produit primaire, ce qui nous conduit à surestimer le rapport de production potentiel. Malgré cette sous-estimation du véritable potentiel de la production en sous-produit, il apparaît improbable que les métaux présentés ci-dessous (indium, tellure, gallium) fassent l'objet d'une production en produit primaire. D'autres métaux à l'inverse ont davantage le statut de coproduit voire sont extraits en produit primaire, leurs ratios s'étendent alors en général entre 0,3 à 1. C'est le cas du cobalt avec le cuivre ou le nickel par exemple. Le lithium relève également plutôt d'une exploitation en coproduit avec le chlorure de potassium puisque son ratio de valorisation économique s'approche de 1.

Un relatif découplage peut avoir lieu entre la production du produit primaire et celle du sous-produit grâce au recyclage des déchets issus des productions antérieures. Ces résidus sont aussi parfois rachetés ou exportés pour être valorisés par des tiers. Or, ces déchets abritent des quantités potentielles non négligeables de métaux rares selon Hagelüken et Mesker (2010). Comme le note Pindyck (1982), le stockage est une des voies possibles pour diminuer l'intensité du lien entre les demandes de deux produits joints. La fourniture d'indium supplémentaire a d'ailleurs maintes fois fait l'usage de cette production secondaire entre 2004 et 2007. En effet, le processus de fabrication d'ITO (Indium-Tin Oxyde) en fines couches est relativement inefficace et seule une partie de l'indium est utilisée, le reste fait l'objet d'un recyclage. Aujourd'hui, le recyclage de ces résidus dépasse la production primaire d'indium issue des raffineries et représente plus de 60% de l'indium utilisé (Naumov et Grinberg, 2009) en 2007 et 65% en 2011 d'après l'USGS (2012).

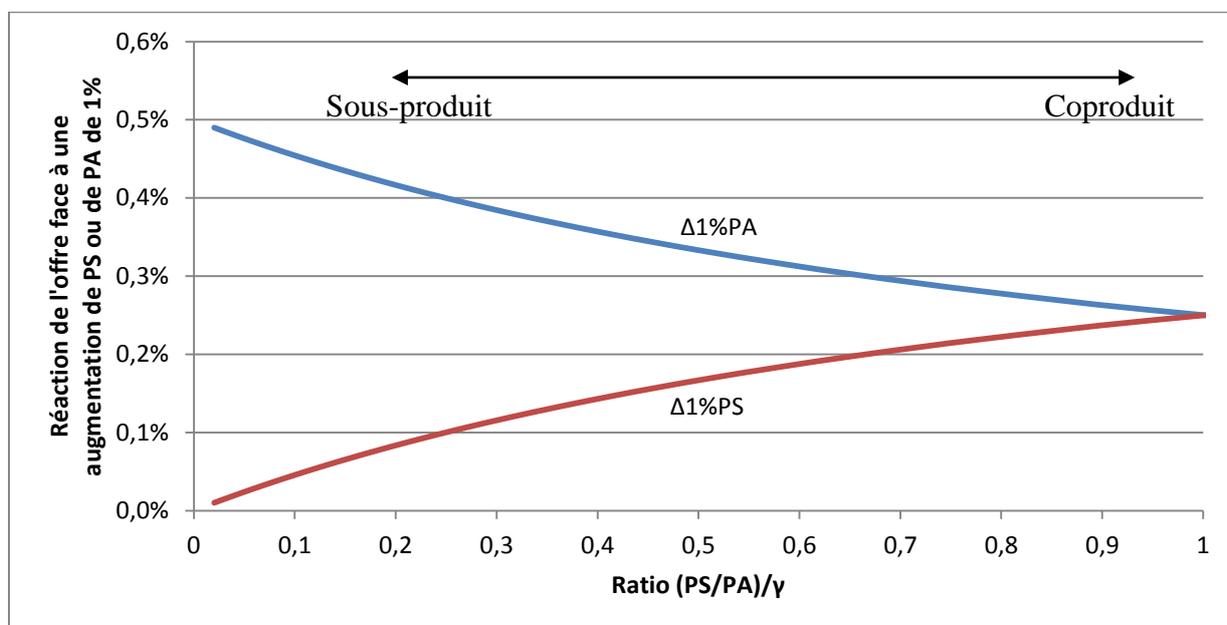


Figure 4-2 Réaction de la production jointe de deux produits par rapport à une variation marginale de leur prix.
Source : calculs de l'auteur

Relation	Raffinerie	Primaire	Sous produit	Rapport Production	Rapport prix	Ratio
Indium-zinc	Auby	300 kt	40t	7500	275	0,04
Tellure-cuivre	Harjavalta+Ronnskar	403 kt	20t	20 150	28	0,001
Gallium-aluminium	Stade	900 kt	30t	30 000	248	0,008

Tableau 4-1 Rapport des productions dans les raffineries de métaux, Source : JRC (2011), calculs de l'auteur

Cependant, la présence de sous-produits dans la production d'un produit primaire n'entraîne pas de valorisation systématique de ces premiers. Il y a plusieurs raisons à cette absence de valorisation des sous-produits. Tout d'abord, dans la plupart des cas, les sous-produits sont tout simplement considérés comme des impuretés et ne sont pas exploités. Leurs présences nécessitent une complexification du procédé de récupération du métal majeur et par conséquent, les producteurs préfèrent en général éliminer ces impuretés en amont ou sélectionnent des minerais avec des taux d'impuretés plus faibles.

Ensuite, c'est tout simplement la technologie et l'inexistence d'infrastructures de traitement de ces métaux qui empêchent souvent cette récupération (Verhoef et al., 2004). Dans la réalité, les sous-produits ne partagent pas que des coûts communs avec le produit primaire mais possèdent également des coûts propres. Or le montant des coûts fixes imputables entièrement au sous-produit varie selon la technologie, le type de sous-produit, le degré de raffinage nécessaire du produit final et le niveau auquel intervient la séparation entre le sous-produit et le produit primaire. Les montants selon les types d'installation peuvent ainsi varier entre 1 M€ et 50 M€ d'après un rapport du JRC(2011), mais les raffineurs n'ont pas toujours les capitaux pour réaliser ces investissements supplémentaires ou plus simplement ne désirent pas s'aventurer hors de leur cœur de métier (les métaux de base). Aujourd'hui, on estime que seul 10% du gallium contenu dans la bauxite est récupéré par cause d'un manque d'équipement dans les fonderies d'aluminium (Jackson et Mikolajczak, 2009). Le constat est quasiment identique pour l'indium, capté dans moins de 26% des raffineries de zinc hors Chine. Par conséquent, une hausse de la demande du sous-produit pourra être satisfaite en accroissant le nombre de mines du produit primaire valorisant le sous-produit, ou en renforçant les taux de récupération du sous-produit par tonne de produit primaire extrait dans le cas de mines exploitant déjà les deux types de métaux. Enfin, la technologie employée pour le produit primaire affecte aussi le taux de récupération, et il existe certaines situations où le basculement vers une technologie plus efficace pour le produit primaire conduit à une diminution du taux de récupération du sous-produit. Ainsi, le tellure est obtenu seulement à partir de l'affinage électrolytique du cuivre fondu, or cette technique est progressivement remplacée par la lixiviation par solvant d'extraction du cuivre qui ne permet pas la récupération du sous-produit (Green, 2006 ; Naumov et Grinberg, 2009). Autre exemple, la récupération du zinc peut se faire grâce à l'hydrométallurgie qui assure des coûts faibles mais

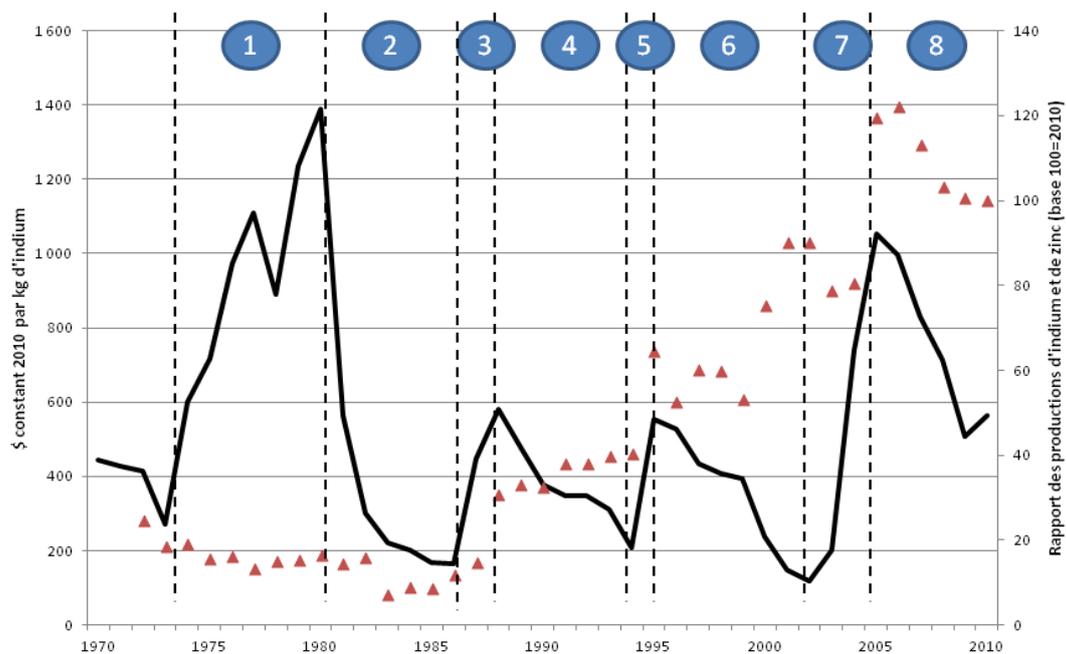
n'offre pas la possibilité de récupérer des résidus ou des métaux en sous-produits comme la pyrométallurgie (Verhoef et al., 2004).

Si nous confrontons ces analyses à la réalité économique, plusieurs enseignements sont à souligner. Aujourd'hui, l'analyse des productions passées de sous-produits et de produits primaires nous conduit à penser que la disponibilité de la plupart des métaux rares n'est pas mise en difficulté. Cette hypothèse est fondée sur l'observation des prix et des rapports de production et de demande dans le temps. Bien que la demande et la production des sous-produits progressent plus rapidement que la demande et la production des produits primaires, les prix des sous-produits n'augmentent pas fortement. A titre d'illustration, les productions de gallium et d'indium ont progressé en moyenne de 9% et 11% par an sur 1990-2000 et de 7% et 6% par an sur 2000-2010. En comparaison les productions d'aluminium et de zinc ont seulement crû d'environ 2% par an sur les périodes 1990-2000 et 5% et 3% par an sur 2000-2010. Ces différents éléments suggèrent donc que le découplage des productions est possible car la production du sous-produit reste encore largement inférieure à la limite de la production potentielle. La production potentielle est la production de sous-produit rendue possible par l'exploitation totale du sous-produit par tonne de produit primaire. Pour le tellure par exemple, deux études (DOE, 2000 ; George, 2009) montrent que la production potentielle de tellure devrait se situer aux alentours de 1000 à 1200 tonnes de tellure pour la production de cuivre de 2008. Or, la production de tellure en 2008 ne dépassait pas 500 tonnes.

Tant que la totalité de l'offre potentielle de sous-produit n'est pas saturée, la production réelle du sous-produit peut varier sans liaison directe avec la production du produit primaire comme l'illustre la Figure 4-1 (quadrants C et D). Le sous-produit peut alors présenter une relative réaction à sa demande et à son prix. Toutefois si la demande de sous-produit augmente beaucoup plus vite que la demande du produit primaire et conduit à faire rejoindre l'offre réelle et l'offre potentielle, la contrainte va alors jouer comme exposée sur la Figure 4-1 (quadrants A et B) et provoquer une hausse importante du prix du sous-produit tout en rationnant la demande.

Néanmoins, la disponibilité des métaux rares peut également être impactée – sa nature de sous-produit mise à part - par des facteurs tels que le pouvoir de marché, les booms et récessions économiques, les grèves, les événements climatiques ou politiques d'une façon temporaire ou plus longue comme le suggère Tilton dans plusieurs de ses articles (Tilton, 2003 ; Tilton et Lagos, 2007 ; Yakzic et Tilton, 2009). Nous pouvons même supposer qu'une

croissance très importante de la demande suite à l'introduction d'une nouvelle technologie ou d'un nouveau produit ne pourra être totalement satisfaite car l'offre minière, de façon générale, souffre d'inertie. Il faut du temps pour équiper plus de raffineries de récupérateurs du sous-produit ou pour améliorer les procédés et les taux de récupération. La trajectoire du prix de l'indium (Figure 4-3) depuis les années 70 est emblématique de ces cycles constitués d'une suite de déséquilibres successifs entre la demande et l'offre comme l'expliquent Scharwz et Herzig (2002) et Hagelüken (2011). La nature de ces cycles inhérente à la production des métaux ne tire pas son origine du statut de sous-produit mais de l'hystérésis de l'offre et des variations subites de la demande (voir en particulier Saadi, 2005).



- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Demande pour les barres de commandes nucléaires. 2. Three Miles Island et récession économique. 3. Développement de l'ITO. 4. Acquisition de stocks par le plan de défense national américain et surproduction mondiale. 5. Hausse de la consommation japonaise principalement pour les besoins en ITO. | <ol style="list-style-type: none"> 6. Hausse du recyclage, déstockage du PDNA, technologie ITO moins intensive, chute de la production d'écran plats. 7. Chute de la production (Fermetures françaises et pénuries chinoises), relance de la demande japonaise coréenne et chinoise, spéculation. 8. Accentuation du recyclage et augmentation de 50% de la production primaire depuis 2003. |
|--|---|

Figure 4-3 Cycles de prix de l'indium et découplage de la production d'indium et de zinc. Source : données USGS, calculs de l'auteur

3 Analyse empirique du lien entre sous-produit et produit primaire

L'objectif de cette partie est de détecter s'il existe une relation entre la production du produit primaire et la production du sous-produit. En effet, l'absence ou la présence d'une telle relation nous permettrait de corroborer l'hypothèse d'une saturation de la contrainte de sous-produit ou au contraire l'existence d'une marge de production. Pour mener cette analyse, nous sommes toutefois contraints par les données disponibles et accessibles. Ainsi, les métaux rares ont été assez peu étudiés car la plupart d'entre eux, à l'exception du molybdène, ne bénéficient pas d'une cotation boursière officielle comme au London Metal Exchange (LME). Les prix de ces métaux sont issus de relations de grès à grès entre les producteurs et les consommateurs (des gros industriels) et il règne donc une relative opacité sur les prix de ces métaux. L'USGS relève toutefois des productions et des prix moyens annuels. Les données de productions et de prix sont donc des approximations. Nous menons trois séries de tests dont les résultats sont détaillés ci-après.

3.1 Evaluation par le test du signe

Pour mettre en évidence cette présence ou absence de lien, le test du signe est généralement mobilisé (Campbell, 1985). Le test du signe revient à comparer les signes des taux de variations annuelles des deux productions. On exclut les zéros puis on vérifie s'il y a significativement plus de signes moins ou de signes plus. Dans le cas d'une relation aléatoire le résultat tend vers une proportion identique de signes moins et de signes plus. La loi de l'échantillon tend vers une loi normale puisque nos échantillons sont composés d'au moins 30 données.

Relation	Observation	Signes +	Signes -	Test du signe	Résultat
Germanium zinc	43	25	18	-0,91	Aléatoire
Indium zinc	34	22	12	-1,54	Aléatoire
Gallium aluminium	36	21	15	-0,83	Aléatoire
Tellure cuivre	52	28	24	-0,69	Aléatoire
Sélénium cuivre	58	35	23	-1,44	Aléatoire
Molybdène cuivre	58	41	17	-3,02***	positif

Tableau 4-2 Test du signe. Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%, Seuils critiques de 1,65*, 1,96**, 2,58***. Source : calculs auteur

Seule la relation, du Molybdène et du cuivre semble attester d'un lien positif entre les deux productions (Tableau 4-2). Les autres cas montrent plutôt une relation aléatoire entre les productions de sous-produit et produit primaire sur la totalité de leur période. Ce test est aussi

réalisé sur des périodes plus courtes (15 et 25 ans), la loi de référence étant alors une loi binomiale (pour $n=15$), mais cela n'amène pas de changements dans nos conclusions.

3.2 Evaluation d'une relation de cointégration

Une autre possibilité consiste à procéder à l'estimation d'un vecteur de cointégration par la méthode en deux étapes d'Engle et Granger (1987).

Pour supposer une relation de cointégration entre deux variables intégrées d'ordre d ($I(d)$), il faut que les résidus de cette relation soient stationnaires $I(<d)$. La deuxième condition nécessaire est d'avoir une relation significative entre les deux variables, autrement dit que le coefficient de régression de la variable explicative soit significativement différent de zéro.

Commençons par vérifier que les séries de production des produits primaires et leurs sous-produits sont intégrées du même ordre. Pour cela nous employons le test de Dickey-Fuller augmenté et le test de Phillips-Perron. Le test de Dickey Fuller augmenté peut être réalisé sur 3 types de modèles :

- 1) Avec un trend déterministe, une constante, et une racine unitaire.
- 2) Une constante et une racine unitaire.
- 3) Une racine unitaire.

Toutes les séries de production des métaux sont stationnaires à l'ordre 1 hormis la production d'aluminium et de zinc qui semblent suivre d'après le test DFA un processus DS-I(2) (Tableau 4-3). Nous vérifions par le test de Phillips Perron, davantage robuste à l'hétéroscédasticité, qui indique un processus DS-I(1). Les séries de production suivent des processus DS avec ou sans dérive.

Nous testons ensuite la stationnarité des résidus obtenus à partir de la régression du logarithme de la production du sous-produit ($\log pds$) sur la production du produit primaire ($\log pda$) et une constante (γ).

$$\log pds_t = \gamma + \delta(\log pda_t) + \varepsilon_t \quad (4-1)$$

Le coefficient δ peut donc être directement interprété comme l'élasticité de long terme entre la production du sous-produit et la production du produit primaire. Lorsque γ n'est pas significativement différent de zéro nous rejetons un modèle avec constante.

Relation	Test sur la variable en niveau			Test sur la variable en Différence première			Conclusion
	1	2	3	1	2	3	
Zinc	-1,57	0,58	5,12	-7,32***	-7,32***	-1,10	I(1)*
Tellure	-3,21*	-3,24**	0,12	-8,56***	-8,55***	-8,63***	I(1)
Cuivre	-1,84	-1,96	6,65	-6,68***	-6,48***	-4,37***	I(1)
Gallium	-2,86	-0,09	1,77	-7,97***	-8,08***	-7,05***	I(1)
Aluminium	-1,46	1,36	3,96	-6,5***	-6,19***	-1,66*	I(1)*
Indium	-2,86	-0,02	1,48	-6,6***	-6,58***	-6,18***	I(1)
Germanium	-2,67	-2,41	0,35	-7,50***	-7,57***	-7,60***	I(1)
Sélénium	-4,02**	-2,59*	1,40	-9,25***	-9,18***	-8,90***	I(1)
Molybdène	-3,51**	-1,99	2,45	-8,35***	-8,40***	-7,76***	I(1)

Tableau 4-3 Tableau 3 Test de Dickey Fuller augmenté, seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : *calculs auteur*

Relation	Période	Observation	γ	δ
Germanium zinc	1957-2011	55	-5,09** (4,47)	0,60*** (0,28)
Indium zinc	1972-2011	40	-59,96*** (4,98)	4,1*** (0,31)
Gallium aluminium	1973-2011	39	-28,06*** (2,61)	1,89*** (0,16)
Tellure cuivre	1950-2003	54	-3,10* (1,58)	0,10 (0,10)
Sélénium cuivre	1950-2011	62	-3,35*** (0,57)	0,66*** (0,04)
Molybdène cuivre	1950-2011	62	-7,30*** (0,67)	1,18*** (0,04)

Tableau 4-4 Valeurs estimées des relations de long terme. Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : *calculs auteur*

Seule la relation entre le tellure et le cuivre n'affiche pas une relation claire sur la totalité de la période (Tableau 4-4). Cela s'explique par des changements de structure régulièrement au cours de la période. Cette relation pourra faire l'objet d'une analyse plus poussée grâce à un découpage en sous-périodes, le faible nombre d'observations nous l'interdisant pour l'instant.

Pour éviter une éventuelle régression fallacieuse, nous vérifions la stationnarité des résidus. Les tests de stationnarité des résidus sont réalisés à partir du DFA et du test Phillips-Perron, les seuils critiques sont toutefois différents car nous n'observons pas directement la série des résidus. Par conséquent, nous utilisons les seuils critiques de stationnarité des résidus d'une relation de long terme fournis par Engle et Yoo (1987).

Relation	Observations	1		2		3		Conclusion
		DFA	PP	DFA	PP	DFA	PP	
Germanium - zinc	55	-2,84	-2,91	-2,85	-2,92	-2,88	-2,95	Non stationnaire
Tellure-cuivre	54	/	/	/	/	/	/	/
Gallium-aluminium	39	-2,12	-2,34	-2,06	-2,21	-2,11	-2,24	Non stationnaire
Indium-zinc	40	-2,17	-2,17	-2,11	-2,12	-2,15	-2,17	Non stationnaire
Sélénium cuivre	62	-3,99**	-3,99**	-4,00**	-4,00**	-4,03**	-4,03**	Stationnaire
Molybdène cuivre	62	-3,62*	-3,77**	-3,61*	-3,82**	-3,64*	-3,86**	Stationnaire

Tableau 4-5 Test de stationnarité pour les résidus des relations de long terme, seuil critique *-3,38 ;**-3,67 ; ***-4,32. Source : calculs auteurs

Sur les six relations envisagées, deux des relations de long terme entre les productions de sous-produits et leurs produits primaires possèdent des résidus stationnaires (Tableau 4-5). Cependant, les résidus bien qu'étant stationnaires présentent une très forte corrélation et nous envisageons donc un modèle à correction d'erreur (ECM).

Il nous faut donc effectuer une régression de court terme prenant en compte les variables estimées dans la relation de long terme mais en différence première (Δ) plus les résidus retardés obtenus à partir de la régression de long terme. Nous nous intéressons uniquement à une seule des deux relations de type ECM possibles, c'est à dire celle avec pour variable expliquée la production du sous-produit et pour variable explicative la production de produit primaire, car nous excluons une causalité inverse.

$$\Delta \log pds_t = \alpha + \beta_1(\Delta \log pda_t) + \beta_2(\log pds_{t-1} - \delta \times \log pda_{t-1} - \gamma) + \varepsilon_t \quad (4-2)$$

Pour le modèle ECM de la relation sélénium- cuivre :

	α	β_1	β_2	F	Observations
Avec constante	0,001 (0,002)	0,75* (0,41)	-0,38*** (0,09)	9,59***	62
Sans constante	/	0,75** (0,31)	-0,38*** (0,09)		

Tableau 4-6 Relation de court terme entre le sélénium et le cuivre. Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : calculs auteurs

Ici, nous pouvons accepter la relation de cointégration entre le sélénium et le cuivre (Tableau 4-6). L'expression du résidu retardé est significativement différente de zéro et négative. On remarque que la production du sélénium réagit davantage aux variations de production du cuivre à court terme qu'à long terme. En une année 38% du déséquilibre par rapport à la relation de long terme est corrigé.

Pour la relation molybdène cuivre :

	α	β_1	β_2	F	Observations
Avec constante	0,012 (0,02)	1,09** (0,45)	-0,32*** (0,09)	8,79***	62
Sans constante	/	1,25*** (0,34)	-0,32*** (0,09)	/	

Tableau 4-7 Relation de court terme entre le molybdène et le cuivre. Source : calculs auteur

Dans cette dernière situation, nous pouvons également accepter l'hypothèse de cointégration des productions (Tableau 4-7). La production de molybdène suit les variations de la production de cuivre de façon plus accentuée à court terme qu'à long terme. Au vu des tests réalisés, la méthode d'Engle et Granger (1987) en deux étapes atteste d'une relation de cointégration entre le sélénium et le cuivre sur la période 1953 à 2011 ainsi qu'entre le molybdène et le cuivre entre 1950 et 2011. Néanmoins la période temporelle sur laquelle nos données s'étendent est longue, plusieurs dizaines d'années. Or sur de telles périodes, nous n'excluons pas d'éventuels changements de structure. Les tests de cointégration d'Engle et Granger (1987) mais aussi de Johansen (1988) ne sont pas robustes à ce type de rupture. Ainsi, ces tests ont tendance à accepter trop souvent l'hypothèse nulle de non cointégration alors que les variables sont cointégrées avec une rupture. La méthodologie et les tests fournis par Gregory et Hansen (1996) permettent d'y remédier.

3.3 Evaluation d'une relation de cointégration avec possibilité de rupture

Le test de Gregory-Hansen permet un changement au niveau du vecteur de cointégration entre deux variables. Il offre deux possibilités, une modification du niveau de la constante, donc un changement de niveau, et un changement au niveau de la totalité du vecteur de cointégration (pente et constante). Le test de Gregory et Hansen emploie une variable dichotomique afin de déterminer à la fois la date de la rupture (τ) dans la relation de long terme tandis que les résidus de la relation de long terme sont analysés afin de déterminer l'absence ou la présence d'une cointégration. Soit dans notre cas, le modèle 1 avec changement de niveau :

$$Q_{st} = \gamma_{1t} + \varphi_{t\tau}\gamma_{2t} + \delta Q_{at} + \varepsilon t \quad t = 1, \dots, n. \quad (\text{Modèle 1})$$

$$\text{Où } \varphi_{t\tau} = \begin{cases} 0 & \text{si } t \leq [n\tau] \\ 1 & \text{si } t > [n\tau] \end{cases}, \tau \in (0,1)$$

Et le modèle avec changement de niveau et de pente :

$$Q_{st} = \gamma_{1t} + \varphi_{t\tau}\gamma_{2t} + \delta_1 Q_{at} + \varphi_{t\tau}\delta_2 Q_{at} + \varepsilon t \quad t = 1, \dots, n. \quad (\text{Modèle 2})$$

Le deuxième avantage de la méthodologie élaborée par Gregory et Hansen repose sur l'absence de postulat sur la date du point de rupture a priori. Si les variables sont cointégrées avec un changement de niveau ou de régime, le test rejettera l'hypothèse nulle de non cointégration. Toutefois, nous préconisons de prendre les résultats avec précaution car Gregory et Hansen ont simulé les valeurs critiques pour des échantillons d'une taille 50 minimum (Gregory et Hensen, 1996, p.108), alors que nos échantillons sont à cheval sur cette limite.

Le test de Gregory-Hansen nous donne les résultats suivants (Tableau 4-8) :

Relation	Date de rupture	Modèle 1	Date de rupture	Modèle 2
Indium-zinc	1989	-3,85	1987	-5,05**
Germanium-zinc	1991	-3,78	1991	-3,86
Tellure cuivre	1979	-3,09	1979	-3,17
Gallium aluminium	2003	-3,79	2003	-3,76

Tableau 4-8 Résultat du test de Gregory Hansen. Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : calculs auteur

Sur les 4 relations ayant fait l'objet du test de Gregory Hansen seule la relation entre l'indium et le zinc serait cointégrée sur le long terme avec un changement de régime (Tableau 4-8). L'estimation de cette relation donne toutefois des résultats assez surprenants. En effet sur la période 72-86, l'indium est cointégré négativement à la production du zinc puis positivement cointégré de 1987 à 2011 (Tableau 4-9). Comme le coefficient de la première période est estimé sur 14 points nous préférons ne pas le considérer, d'autant que nous verrons que cette baisse de la production d'indium parallèlement à la hausse de la production de zinc a une explication économique (voir Figure 4-3).

Période	γ	δ	observations
1972-1986	52,47*** (17,5)	-3,12*** (1,12)	15
1987-2011	-45,91*** (4,42)	3,23*** (0,28)	25

Tableau 4-9 Relation de long terme entre l'indium et le zinc sur deux périodes. Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : calculs auteur

Les tests DFA et Phillips Perron valident l'hypothèse de stationnarité des résidus issus de cette régression de long terme ($\varepsilon_t \sim I(0)$).

Nous réalisons ensuite un modèle de type ECM sur la période 1987-2011 :

	α	β_1	β_2	F	observations
Avec constante	0,08* (0,04)	0,64 (1,03)	-0,32*** (0,10)	4,91**	25
Sans constante		1,77* (0,89)	-0,37*** (0,11)	/	

Tableau 4-10 Relation de court terme entre l'indium et le zinc. Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : calculs de l'auteur

L'indium semble moins réagir à court terme qu'à long terme aux variations de la production de zinc (Tableau 4-10).

3.4 Synthèse des résultats

A l'issue de ces tests, seules les relations du molybdène-cuivre et du sélénium-cuivre semblent varier conjointement. Les autres relations n'attestent pas d'un tel lien, mais on ne

peut cependant pas exclure une relation plus complexe les unissant, avec par exemple des phénomènes de stockage et déstockage des métaux rares.

Encore une fois, la nature des données et le nombre limité d'observations nous obligent à rester très prudents à la fois sur l'affirmation d'une relation ou au contraire son rejet. Même dans la situation où le sous-produit suit les variations du produit primaire, ces dernières n'expliquent jamais plus d'un quart des variations du sous-produit. Ce relatif découplage nous pousse à penser que les marchés des métaux rares correspondent davantage à la situation décrite sur la Figure 4-1 (cadrans C et D) avec la présence d'une offre réelle inférieure à l'offre potentielle. La contrainte de sous-produit ne joue encore qu'un rôle marginal et c'est davantage la demande et l'introduction de nouveaux usages qui influencent la production de ces métaux rares.

Il ne faut cependant pas conclure à l'absence future de contraintes et exclure que les métaux possédant une marge de production puisse à l'avenir saturer leur offre potentielle du fait de l'introduction de ces nouveaux usages.

4 Evaluation prospective de la saturation de l'offre potentielle

Nous procédons en deux étapes en estimant dans un premier temps l'offre potentielle de sous-produit et en la confrontant ensuite à des scénarios d'évolution de la demande en métaux rares émanant du secteur photovoltaïque.

4.1 Estimation de l'offre potentielle de sous-produit

Il s'agit d'évaluer l'offre potentielle de chaque sous-produit et son évolution future afin d'établir si l'évolution de la demande du sous-produit permet d'envisager une saturation de la contrainte et donc une réaction sur les prix. Pour cela, il nous faut déterminer quelle est la quantité moyenne de sous-produit récupérable (tellure, gallium, indium) par tonne extraite de leur produit primaire (cuivre, aluminium, zinc), soit en d'autres termes le rapport moyen (Qa/Qs). En termes de données, nous nous appuyons à la fois sur des études et des rapports

existants pour approximer les ordres de grandeur de l'offre potentielle des différents sous-produits (tellure, gallium, indium).

Pour le tellure, nous avons repris les chiffres établis principalement sur George (2009), Bleiwas (2010) et Green (2006) indiquant une offre potentielle de 1300 tonnes de tellure pour la production actuelle de cuivre.

Le gallium est présent à environ 50 ppm en moyenne dans les gisements de bauxite d'après Jaskula (2012). L'aluminium, lui, constitue environ 41% des gisements de bauxite au niveau mondial d'après l'International Aluminium Institute (2008). Nous obtenons ensuite directement le rapport aluminium-gallium, ce qui nous conduit à une estimation d'environ 5000 tonnes potentielles de gallium par an.

Pour l'indium, les chiffres de l'USGS de Jorgenson et George (2004, p.5), suggérant une concentration moyenne de 14 ppm d'indium dans les gisements de zinc, serviront de base à l'analyse. D'autres études fournissent des concentrations moyennes s'établissant entre 10 et 20 ppm (Alfantazi et Moskalyk, 2003 ; Ayres et al., 2002). Pour le zinc, nous avons repris les chiffres reportés par Valero et al. (2011) évoquant une concentration moyenne de zinc d'environ 6,05%, ce qui correspond également aux chiffres de Mudd (2010). Le ratio indium-zinc nous mène à une offre potentielle d'environ 2780 tonnes par an d'indium. Nos estimations sont, dans ce contexte, cohérentes avec les propos tenus par Jackson et Mikolajczak (2009) assurant que seulement un quart de la production potentielle d'indium était entreprise (ce qui correspondrait à une offre potentielle de 2400 tonnes).

De manière générale, hormis pour l'indium, nos chiffres apparaissent comme en cohérence avec les résultats de l'étude de Peiró et al. (2011). Il faut néanmoins avoir conscience de la portée réduite du calcul de ces offres potentielles (Tableau 4-11). Rien n'assure en effet que ce raisonnement en moyenne soit valable économiquement pour des gisements où le sous-produit est présent à très faible concentration.

Relation concernée	Etude de référence	Offre réelle 2011	Offre potentielle
Tellure-cuivre	George ; DOE ; Green.	≅500t/an	1300t/an
Gallium-aluminium	JRC ; Jaskula	≅200t/an	5000t/an
Indium-zinc	Jorgenson et George ; Valero et al.	≅600t/an	2780t/an

Tableau 4-11 Offre potentielle de plusieurs métaux rares. Source : calculs auteur

4.2 Extrapolation sur la disponibilité future

Les quantités de métaux requises pour produire un MW crête de panneaux photovoltaïques nous sont fournies par une étude de l'USGS (Bleiwas, 2010) et du JRC (Tableau 4-12 et Tableau 4-13).

Métaux	USGS kg/MWc	JRC kg/MWc
Indium	22,5	18,99
Gallium	7,5	2,34
Sélénium	45	9,56

Tableau 4-12 Quantités de métaux requises pour un MWc de CIGS. Source : Bleiwas (2010) et JRC (2011)

Métaux	USGS kg/MWc
Tellure	97,5
Cadmium	85

Tableau 4-13 Quantités de métaux requises pour un MWc de CdTe. Source : Bleiwas (2010)

Le développement des panneaux photovoltaïques au niveau mondial est fondé sur la projection centrale de l'EPIA (*European Photovoltaic Industry Association*) disponible dans le rapport *Solar photovoltaic electricity empowering the world* (2011). D'après cette référence, le marché du photovoltaïque devrait atteindre 96 GWc, 162 GWc et 174 GWc d'ici respectivement 2030, 2040 et 2050. Ces chiffres sont relativement proches des projections de l'*Energy Technology Perspectives* de l'IEA (2010b). D'après cette dernière source, le marché du photovoltaïque à l'horizon 2030, 2040 et 2050 devrait approcher respectivement 105GWc, 127GWc et 141GWc par an.

Toutefois, il faut prendre en compte plusieurs facteurs pour correctement évaluer la dynamique de la consommation future de ressources et l'éventuelle contrainte liée au statut de sous-produit. Tout d'abord l'offre potentielle évolue en fonction de la production du produit primaire. Pour le cuivre, le zinc et l'aluminium nous avons pris comme référence l'évolution passée des quarante dernières années et nous aboutissons à une hausse de 2,5% par an pour le cuivre, 2% pour le zinc et 3,5% pour l'aluminium. Nous envisageons également la possibilité d'une hausse du recyclage (Tableau 4-14) et de l'efficacité d'utilisation de ces métaux rares

(Réduction de l'épaisseur du layer et hausse du rendement). Le recyclage est intégré avec une durée de vie moyenne des panneaux photovoltaïque de vingt ans.

Variable	Etude	Haute	Basse
Recyclage	Candélise et al, 2011.	90%	0%
Contenu en métal	Fthenakis, 2009.	-80% CdTe ; -65% CIGS	-35% CdTe; -40% CIGS

Tableau 4-14 Hypothèses sur le recyclage et l'efficacité d'utilisation d'ici à 2050. Source : auteur

Enfin, il existe plusieurs technologies de panneaux photovoltaïques qu'on classe généralement en trois générations. La première génération, la technologie à base de silicium, occupe aujourd'hui la majeure partie du marché, soit encore plus de 80% (voir Jäger-Waldau, 2012). La seconde génération, les panneaux photovoltaïques à couches minces, commencent à accroître leur part de marché, et devrait atteindre 45% de part du marché photovoltaïque en 2025 contre seulement 17% en 2011 d'après l'IEA (2010b). La troisième génération, les cellules organiques ou les technologies avancées de couches fines, n'en est encore qu'au stade de recherche et développement. La répartition du marché à venir entre les différentes technologies (Tableau 4-15) a été abordée par plusieurs études notamment celles du JRC (2011) et de l'IEA (2010b).

Type	Hypothèse basse 2020, 2035, 2050.	Hypothèse haute 2020, 2035, 2050.
CIGS PV	5%	18%
CdTe PV	7%	10%

Tableau 4-15 Hypothèse de pénétration des différentes technologies photovoltaïques. Source : JRC (2011), IEA(2010b)

L'application des hypothèses les plus défavorables nous fournissent les quantités les plus élevées requises tandis que les hypothèses les plus favorables nous permettent d'obtenir les plus faibles quantités nécessaires pour la croissance du photovoltaïque à couches minces (Tableau 4-16) :

Metal	2025 Demande et offre		2040 Demande et offre		2050 Demande et offre	
Tellure	365 - 685 t	1800 t	200 - 1120 t	2600 t	0 - 1120 t	3320 t
Indium	50 - 285 t	3590 t	50 - 435 t	4835 t	0 - 430 t	5890 t

Gallium	25 - 95 t	7820 t	15 - 145 t	13100 t	0 - 145 t	18480 t
---------	-----------	--------	------------	---------	-----------	---------

Tableau 4-16 Comparaison entre la demande de métaux rares pour le PV et l'offre potentielle. Source : *calculs auteur*

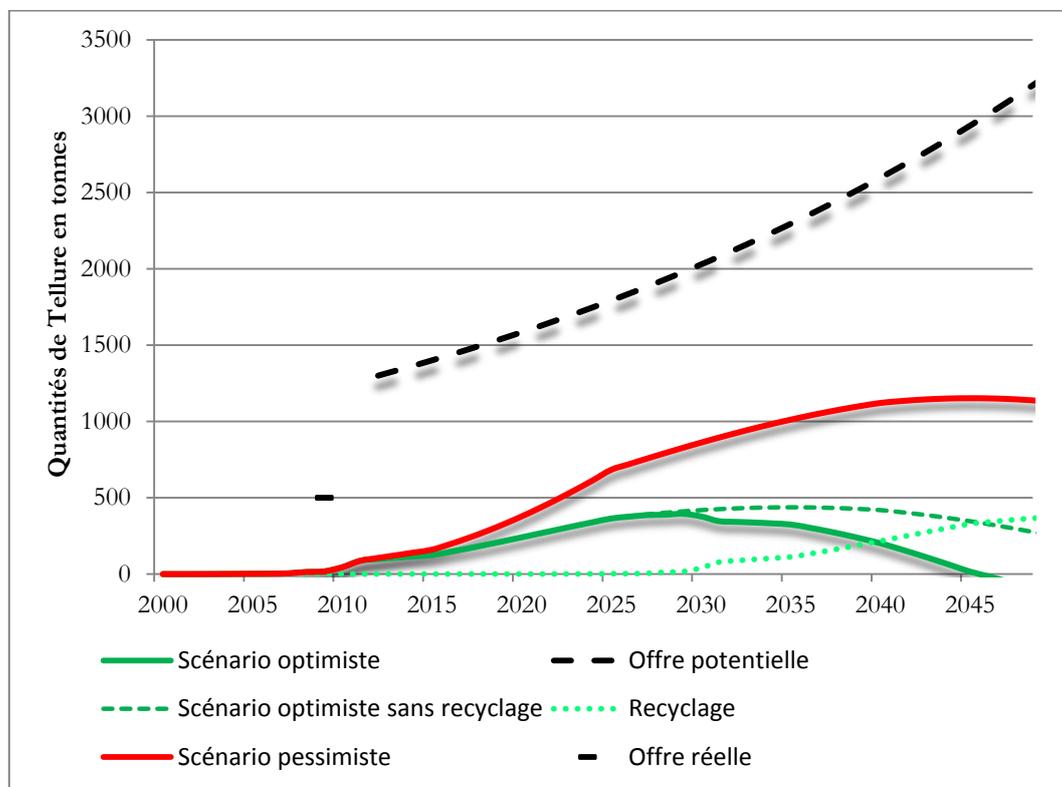


Figure 4-4 Évaluation de la saturation de l'offre potentielle du tellure. Source : *calculs auteur*

Au final, même dans le scénario le plus pessimiste en termes d'utilisation des ressources en tellure, gallium et indium, le secteur du solaire photovoltaïque ne monopolisera que 45% à moins de 1% de l'offre potentielle (voir Figure 4-4 pour le tellure).

Néanmoins, la percée du solaire photovoltaïque nécessitera une plus grande mobilisation de l'offre potentielle que celle effectivement mise en œuvre aujourd'hui. Les quantités requises pour la construction de panneaux à couches fines pourraient représenter d'ici à 2050, un dixième à deux fois la production de sous-produit des raffineries actuelles. L'ensemble de ces résultats doit cependant être replacé dans un ensemble de risques et limites que nous fournissons ci-après.

4.3 Discussion

Pour commencer par les risques, nous devons rappeler que nous ne considérons que la croissance des besoins du secteur du photovoltaïque indépendamment de ce qui pourrait survenir dans d'autres secteurs utilisant ces mêmes métaux (électroniques, transports, ...). Or,

le secteur de l'électronique par exemple représente aujourd'hui une des parts relatives les plus élevées de la consommation de ces métaux mineurs. L'intégration de la croissance des besoins de ces autres secteurs pourrait donc radicalement changer les conclusions tirées ici. De plus, comme évoqué précédemment, l'analyse des faits passés soulignent l'importance grandissante de la Chine à la fois en tant que producteur et consommateur de premier rang. Le ralentissement de la croissance chinoise et donc de la demande de métaux de base pourrait avoir des conséquences importantes sur l'offre potentielle des métaux rares via la réduction de la production de leurs produits primaires. Par ailleurs, la diversification des technologies employées au niveau du solaire photovoltaïque est ici envisagée comme un atout de taille même si elle limite du même coup les possibilités de déploiement d'importantes économies d'échelle et d'effet d'apprentissage. Le recours à une technologie unique - on pense évidemment à l'emploi généralisé de panneaux à couches minces à base de cadmium-tellure ou de type CIGS - amènerait très rapidement la production des métaux rares à leur offre potentielle maximale. A titre d'exemple, un verrouillage technologique en faveur d'une seule technologie photovoltaïque nécessiterait de 6 kt à 11 kt de tellure par an pour la technologie CadTe, et de 1,8 à 2,5 kt d'indium par an pour la technologie CIGS.

D'autres facteurs devraient, au contraire, rendre moins probable le rapprochement de cette offre potentielle. Il convient par exemple de souligner l'usage répandu de ces métaux dans d'autres secteurs que les nouvelles technologies de l'énergie. Le gallium est par exemple utilisé dans les diodes laser et dans les Smartphones comme le montre Jaskula (2010). Il est probable qu'une forte croissance simultanée des secteurs utilisant des métaux mineurs parallèlement au secteur des nouvelles technologies de l'énergie entrainera une pression et une montée des prix des sous-produits poussant elle-même à un effet d'éviction envers le secteur possédant la plus forte élasticité prix. Par exemple, le lithium n'est pas considéré comme essentiel dans la production de l'aluminium, c'est pourquoi il a été progressivement substitué par d'autres matériaux dans ce secteur, ce qui a permis de libérer davantage de lithium pour le secteur des batteries (où son rôle est plus critique). Similairement, Woodhouse et al. (2012) estiment que la technologie CadTe peut subir un accroissement du prix du tellure d'un facteur dix sans perdre son avantage compétitif. C'est donc plus probablement le secteur de la production d'acier qui substituerait le tellure (par du bismuth ou du calcium) si jamais le prix du tellure venait à augmenter d'une façon trop pressante. Par conséquent, l'effet de substitution limite ainsi la possibilité d'un conflit d'usage entre plusieurs secteurs et le rapprochement de l'offre potentielle des sous-produits. Ensuite, une incertitude prégnante

repose sur le volume des stocks de sous-produits accumulés sous forme de résidus du produit primaire, c'est-à-dire la différence cumulée entre l'offre potentielle et l'offre primaire. Leur ordre d'importance, leurs accessibilités techniques et économiques, leurs locations et leurs propriétaires, ainsi que les dispositions environnementales les touchant demeurent méconnues à ce jour et nécessiteraient des études complémentaires, car ils pourraient agir comme tampon en cas de saturation de l'offre potentielle. Enfin, la relation de sous-produit et produit primaire n'est pas exclusive, on trouve ainsi du gallium dans des minerais de charbon et de l'indium dans certains gisements de cuivre. S'il est moins intéressant aujourd'hui d'avoir recours à ces produits primaires, rien ne dit que les relations entre les sous-produits miniers et leurs produits primaires ne soient pas bouleversées dans le futur.

Le statut de sous-produit doit aussi être perçu comme une opportunité qui permet à la plupart de ces métaux rares d'avoir la possibilité d'être produit de façon rentable tout en assurant un bilan environnemental moins défavorable. Du point de vue du producteur, la possibilité de produire plusieurs métaux à la fois le conduit à réaliser des économies d'envergure comme défini par Panzar et Willig (1977, 1981) et Baumol (1977), sur une partie de ses coûts⁹², ce qui est socialement optimal. Il existe des économies d'envergure lorsqu'une entreprise produisant plusieurs biens produit à un plus faible coût total que si les biens étaient fabriqués dans deux entreprises différentes. Plus formellement, on parle de sous additivité de la fonction de coût :

$$C(Qa, Qs) < C(Qa, 0) + C(0, Qs) \quad (4-3)$$

Où Q_s est la quantité de sous-produit et Q_a la quantité de produit primaire. Le cas du sous-produit minier reflète un cas extrême des économies d'envergure car la production du sous-produit ne pourrait pas être mise en œuvre économiquement dans une entreprise différente du produit primaire minier. Nos deux productions vérifient également une complémentarité de coûts, c'est-à-dire que le coût marginal de produit primaire peut être abaissé grâce à l'augmentation de la production du sous-produit. Soit :

$$\frac{\partial}{\partial Q_s} \left(\frac{\partial C(Qa, Qs)}{\partial Qa} \right) = \frac{\partial C(Qa, Qs)}{\partial Q_s \partial Qa} < 0 \quad (4-4)$$

D'un point de vue empirique, ce type de relation s'explique par la réduction des impuretés à traiter pour obtenir le produit primaire et par la réduction des coûts de stockage des déchets

⁹² Ces économies sont réalisées sur les coûts avant le point de séparation des deux productions.

miniers en aval (voir Packey, 2012). Plus généralement, une mise en production séparée de l'indium et du zinc conduirait à une inflation de la somme des coûts économiques et environnementaux et celle-ci n'est efficace ni à l'échelle de la société ni au niveau microéconomique du producteur. Les économies d'envergure trouvent leur origine dans la présence de coûts fixes indivisibles et de compétences et savoir-faire employables à la fois pour le sous-produit et le produit primaire.

Toutefois si jamais il arrivait qu'un sous-produit en vienne à saturer son offre potentielle et que le recyclage et l'efficacité d'utilisation ne suffisent pas à compléter la demande, une augmentation du prix sans forte réaction de l'offre est à craindre. Un tel scénario, bien que peu probable, pourrait survenir suite à l'introduction d'une nouvelle technologie consommatrice du sous-produit ou d'un volontarisme politique plus pressant sur les technologies vertes. Dans tous les cas, les mécanismes de marché devraient s'avérer relativement inefficaces. Comme on l'a signalé, l'offre risque de ne pas réagir ou du moins, dans une proportion insuffisante pour subvenir à la hausse de la demande. L'effet substitution de la demande opérera certainement mais avec une certaine faiblesse, car l'élasticité prix de la demande atteint souvent des niveaux très faibles compte tenu de la faible part du coût des métaux rares dans le coût du produit final. Par ailleurs, la suppression via l'effet de substitution de ces sous-produits entraînera des déperditions sur les qualités des produits finaux tandis que les seules possibilités de substitution actuelles des métaux rares sont dans la plupart des cas, les métaux rares. La pression sur un marché s'étendra sur les autres marchés provoquant une variation similaire des prix des autres métaux rares aux qualités physico-chimiques similaires.

N'oublions pas que suite à un tel événement, la concentration géographique élevée de la production de ces métaux avec une part dominante de la Chine renforce la crédibilité de l'hypothèse d'une sauvegarde de l'usage de ces ressources pour les industries nationales avec application de quotas à l'export. Face à cela, l'Etat pourrait avoir un rôle à jouer en assurant une veille technologique associée à ces métaux spécifiques afin de prévoir d'éventuels sursauts à venir de la demande. L'encouragement de la collecte et du recyclage des produits en fin de vie ou des déchets miniers comportant des métaux rares via l'usage d'instruments économiques ou juridiques doit être également une priorité. La recherche et développement favorisant la substitution vers des métaux de base comme le prône Diederer (2010) ou diminuant l'intensité d'utilisation est aussi un tremplin susceptible de nous faire éviter une importante pénurie future de ces métaux rares. D'après Skinner (1976), les métaux rares au

sens géologique sont caractérisés par des conditions géologiques très spécifiques au niveau de la concentration moyenne de la croûte terrestre. L'exploitation de ces métaux à grandes échelles pourrait nous mener rapidement à la barrière minéralogique, ce qui aurait comme conséquence directe de devoir fournir une plus grande quantité d'énergie pour extraire la même quantité de métal (un facteur de 10 à 100 est évoqué). Quelle que soit la vraisemblance de la barrière minéralogique soutenue par Skinner, les métaux mineurs sont plus rares que les métaux de base, nous ne pouvons donc pas les utiliser comme ces derniers sans nous exposer à un rapide épuisement économique de ces métaux.

5 Conclusion

En conclusion, les faits empiriques semblent indiquer une faible relation contrainte entre les productions de métaux majeurs et leurs sous-produits (métaux rares). Ceci s'explique probablement en grande partie par la présence de marges de production pour les sous-produits et la possibilité d'exploiter d'anciens « stériles » (résidus miniers non valorisés). Compte tenu de l'information disponible sur le déploiement potentiel du secteur photovoltaïque, celui-ci ne devrait pas buter contre la contrainte de sous-produit des métaux rares dont il a l'usage. Cependant, cette simulation par scénario ne doit pas cacher l'ensemble des limites à la fois économiques, techniques et géopolitiques qui entoure cette problématique. L'économie des métaux rares reste opaque et l'information incomplète caractérise la plupart de ces marchés (pas d'informations publiques, pas de marchés organisés). Cette absence d'information sur les métaux rares souligne aussi l'intérêt de produire des données mais aussi des analyses sur leurs usages en constante évolution et les mécanismes économiques les régissant. La place de l'économiste peut alors consister à apporter des éclairages possibles sur ces mécanismes afin de limiter cette incertitude prégnante. Les bénéfices attachés à la prospective économique centrée sur les métaux rares pourraient d'ailleurs dépasser l'intérêt strict du secteur et mettre en lumière les conditions énergétiques de réalisation des politiques de développement d'énergie renouvelables dans les pays de l'OCDE.

N'oublions pas non plus que l'épuisement économique des métaux majeurs conduit les producteurs à favoriser de plus en plus une gestion de la production des métaux en coproduits et sous-produits. Cette généralisation de la coproduction suffit pour l'instant à maintenir des prix bas pour les métaux majeurs. Néanmoins, cela a pour conséquence de réduire encore

l'élasticité de l'offre à court terme de la production générale face au prix d'un métal en particulier. Cette baisse de l'élasticité à court terme de l'offre d'un métal face à une demande souvent relativement inélastique ne peut qu'accroître la volatilité des prix. La volatilité appelle à la fois un effort de prospective supplémentaire sur les variations futures de la demande mais aussi un besoin en instrument de couverture accru. Or sur cette question, nous avons rappelé précédemment que les métaux rares ne bénéficient pas de marchés à terme. Par conséquent, les entreprises minières et les industriels directement impliqués dans la production et l'usage de ces derniers s'exposent à un risque important lié à des variations futures des prix sans pouvoir néanmoins s'en protéger efficacement grâce à des instruments de couverture. Le chapitre suivant a donc pour objet de déterminer les causes et les conséquences de cette absence de marché à terme pour les métaux rares.

CHAPITRE 5 : ANALYSE DES RISQUES ATTACHES A L'ABSENCE DE MARCHE ORGANISE

« Americans have been more successful at decoupling GDP from happiness than in decoupling it from material and energy».
Victor P., *Managing without growth*, 2008.

« La seule certitude, c'est que rien n'est certain ».
Pline l'Ancien.

1 Introduction

Le futur implique nécessairement de l'incertitude. On pourrait même ajouter que concernant l'avenir la seule certitude c'est l'incertitude. C'est donc pourquoi les agents économiques ont cherché à se couvrir dès le XVIème siècle (marché de la tulipe) face à de potentielles variations inattendues de bien être et de profits futurs. L'absence de visibilité future sur l'offre et la demande et donc par conséquent sur les prix génère de l'incertitude et oblige les agents à former leur propre anticipation du prix futur de la ressource. Leurs décisions d'achats et de ventes sont dans ce cadre alors entièrement fondées sur leurs anticipations. Or, rien n'assure que des individus basés sur leurs anticipations prennent nécessairement des décisions attachées au futur compatibles entre elles. Cette incertitude radicale (au sens de Knight) concernant le futur peut parfois même pousser les agents à redouter leurs erreurs futures suite à une mauvaise formation de leur anticipation. Ceci les conduits à calquer leurs comportements sur des agents qu'ils estiment mieux informés. Le mimétisme conforte les agents économiques et les assure de ne pas faire moins bien que la moyenne (c'est la convention de Keynes), mais il produit surtout des phénomènes moutonniers dont peuvent profiter des agents mieux informés.

Si les matières agricoles ont bénéficié dès les années 1860 de la création de contrats à terme (*forwards*⁹³), il a fallu attendre 1929 pour voir apparaître un marché à terme cotant un métal reporté par le Wall Street Journal (étain). Le London Metal Exchange (LME) revendique

⁹³ Les contrats *forwards* sont différents des contrats *futures*. La distinction est très bien établie par Carlton (1984) : les contrats *futures* sont standardisés, liquides et bénéficie d'une chambre de compensation. Les *forwards* sont constitués dans l'intention principale de délivrer physiquement la commodité ou d'en prendre livraison, les caractéristiques du contrat s'adaptent alors à la spécificité des parties prenantes (point de livraison, qualité de la commodité, temps de livraison). Au contraire, les contrats *futures* restent des marchés papiers où la plupart des transactions ne donne lieu à aucune livraison (d'où l'intérêt d'une standardisation accrue).

l'existence d'une pratique plus ancienne avec des échanges de contrats à terme de cuivre et d'étain depuis 1869. D'autres métaux majeurs ont ensuite suivi et cela jusqu'à la fin du XXème siècle. Au contraire, les métaux mineurs n'ont pas fait l'objet de création d'un marché à terme jusqu'en 2010. En effet, le cobalt et le molybdène - deux métaux mineurs dérivant progressivement par leurs caractéristiques vers les métaux majeurs - sont entrés au LME en février 2010 (Tableau 5-1). Les autres métaux mineurs sont toujours de fait, des marchés totalement inorganisés avec des échanges restant dominés par des transactions de gré à gré.

Marché à terme et métaux	Wall Street Journal	LME
Aluminium		1978
Argent	1931	
Cobalt		2010
Cuivre	1935	1869
Etain	1929	1869
Fer	1955	
Molybdène		2010
Nickel		1979
Or	1975	
Palladium	1968	
Platine	1959	
Plomb	1934	1920
Zinc	1934	1920

Tableau 5-1 Historique des créations de marché à terme pour les métaux. Source : Carlton (1984), LME

Dès lors nous pouvons nous demander pourquoi les marchés des métaux mineurs demeurent inorganisés alors que les métaux majeurs connaissent des marchés à terme depuis le XIXème siècle ? L'analyse de cette problématique nous conduira à nous pencher sur les facteurs de création d'un marché *futures*. Une seconde question revient à nous interroger sur les conséquences de l'absence de marché *futures* sur l'extraction optimale d'une ressource épuisable. Nous verrons que la réponse à cette question dépend particulièrement du type de formation des anticipations adoptées par les agents et de la stratégie adoptée par ces derniers pour pallier l'absence de marché *futures*. La création récente du marché du molybdène et du cobalt apparaît aussi comme une occasion particulièrement intéressante pour évaluer si le comportement du marché au comptant s'est modifié suite à la création d'un marché à terme. Nous discuterons ensuite des stratégies théoriques possibles développées par les agents économiques pour pallier l'absence de marché *futures* et celles réellement mise en œuvre sur les marchés des métaux mineurs. Enfin, nous observerons des risques potentiels de manipulation auxquels s'exposent les marchés des métaux mineurs du fait de leur taille réduite.

2 Causes concourant à la création de marché à terme

2.1 Littérature établie sur les causes de l'émergence des marchés à terme

La présence d'incertitude ne peut être le seul critère de formation d'un marché *futures* sans quoi la quasi-totalité des marchés de métaux mineurs seraient associés à des marchés à terme. La création d'un marché à terme nécessite vraisemblablement un ensemble de pré-requis pour être créés mais également pour ne pas disparaître dans les années qui suivent. Ces pré-requis doivent être en tout logique remplis par les marchés des métaux majeurs mais absents des métaux mineurs. Ainsi Carlton (1984) remarque que les marchés *futures* partagent un ensemble de caractéristiques communes parmi lesquelles on peut compter : une incertitude importante affectant le marché sous-jacent, une forte corrélation des prix entre les différents types de qualités et de localisation de la commodité, un nombre de participants élevé, une faible intégration verticale, une valeur totale du produit vendu élevée donc risquée, et une absence de régulation. Parmi celles-ci nous devons constater que les métaux mineurs ne remplissent pas la plupart de ces critères. Les marchés des métaux mineurs sont de taille très réduite (quelques millions à moins d'un milliard de dollars⁹⁴) et constitués de très peu d'acteurs compte tenu d'un nombre restreint d'applications pour chaque métal. De la même manière, les métaux mineurs possèdent des qualités très différentes de raffinage suivant que la demande émane du secteur des verres et céramiques, de la sidérurgie ou de l'électronique. Ces métaux font aussi l'objet d'une production davantage concentrée en Chine, or la politique chinoise en matière de ressources naturelles est davantage interventionniste et régulatrice (avec des politiques de quotas à l'export et de taxes).

La taille relativement réduite des marchés de métaux mineurs apparaît comme l'une des principales causes de l'absence de marchés à terme. Ainsi Telser et Higinbotham (1977) suggèrent qu'un marché *futures* ne permet pas simplement de couvrir les risques liés à l'incertitude mais assure aussi la liquidité du marché. Il garantit également le risque de contrepartie (via les chambres de compensation). Or, la couverture de ce risque de contrepartie a un coût, et il semble inutile d'assumer ce coût supplémentaire lorsque le marché comporte peu de participants et peu de modification des participants. L'analyse coût-bénéfice menée par les auteurs met en avant un ensemble de critères impactant les coûts du marché *futures* et ses bénéfices. La fonction de coût d'un marché *futures* est une fonction croissante du volume échangé, du nombre de positions ouvertes et de l'écart type des prix. Les bénéfices

⁹⁴ Ces chiffres correspondent à la valeur annuelle des transactions physiques effectuées sur ces métaux.

attachés à un marché *futures* dépendraient de manière croissante du volume échangé, du nombre de positions ouvertes, des variations imprévisibles affectant le prix, et du nombre de participants pouvant bénéficier du marché futur. Là encore, l'étude de Telsen et Higinbotham semble conforter l'idée d'un bénéfice réduit attaché à la création de marché à terme pour les métaux mineurs notamment du fait d'un nombre de participants minimales.

Autre considération, la constitution d'un marché à terme ne garantit pas nécessairement sa réussite et sa survie. Brorsen et Fofana (2001), par l'intermédiaire d'une étude économique de panel regroupant essentiellement des ressources agricoles, ont démontré les principales causes contribuant à la réussite ou l'échec d'un marché *futures*. Via un modèle économétrique de panel, les chercheurs ont réussi à isoler l'effet de plusieurs variables sur la réussite (ici approximé par le volume échangé et le nombre de positions ouvertes) ou l'échec d'un marché *futures*. Trois variables parmi lesquelles : la volatilité du prix, la taille du marché, l'homogénéité de la commodité impactent favorablement les variables représentant la réussite d'un marché *futures*. Au contraire, le coût de la liquidité mais aussi la concentration des acheteurs affectent négativement la réussite d'un marché *futures*. Cette première approche bien qu'enrichissante comporte un certain nombre de limites. Tout d'abord, un certain nombre de variables explicatives sont des variables non mesurables directement (comme l'homogénéité), elles ont donc dû faire l'objet d'évaluation par un groupe de sept experts (listés par N'Zue, 1995) via l'approche de Delphi. Ceci peut expliquer le signe positif contraire à la théorie concernant l'effet de l'intégration verticale déterminé par le modèle. Enfin, les auteurs se sont focalisés uniquement sur les marchés possédant des *futures* car ces derniers disposent logiquement de davantage de données publiques disponibles. Cette démarche est logique au vue de leur problématique mais reste limitée pour expliquer les causes de l'absence de marché *futures*.

2.2 Vers la création de marchés à terme ?

En ce qui concerne les métaux, la création de marché à terme doit dépendre essentiellement de la taille du marché. Plus un marché croît plus le risque généré par l'incertitude augmente. Ceci peut s'expliquer à la fois par un risque engendré par le prix de la ressource que par un risque porté sur les quantités. Au contraire, plus la taille d'un marché s'accroît moins les coûts de transaction rapportés à sa taille et à la valeur des échanges sont importants. Passé un seuil, la création d'un marché à terme doit donc se justifier car le coût économique lié à l'incertitude dépasse les coûts économiques induits par la création d'un marché à terme. Ainsi, un modèle

économétrique du type logit⁹⁵ réussit à prédire l'absence ou l'existence de marchés *futures* simplement grâce à la valeur unitaire de la commodité et le volume de production mis sur le marché. L'utilité liée à la création d'un marché organisé dépendant de la valeur générée par celui-ci nous décomposons cette valeur par un effet prix et un effet quantité.

Le modèle de type logit cherche à expliquer l'absence ou la présence de marché *futures* suivant le prix et la production linéarisés⁹⁶ du métal considéré. La probabilité p_i qu'un métal i détienne des marchés *futures* est exprimée par la relation suivante :

$$P_i = Prob(Mo_i = 1) = Prob[C + \alpha_1 \ln(\text{production}_i) + \alpha_2 \ln(\text{prix}_i) + \mu_i] \quad (5-1)$$

Avec $i = 1, \dots, n$

Où Mo est une variable dichotomique codée 1 pour la présence d'un marché à terme et 0 pour son absence, prix représente le prix en dollars par kg du métal i , et production la quantité en tonnes de métal i mise sur le marché. Nous pouvons exprimer ensuite la probabilité d'apparition de l'événement prédit par le modèle logistique sous une forme plus simple :

$$\ln\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = C + \alpha_1 \ln(\text{production}_i) + \alpha_2 \ln(\text{prix}_i) + \mu_i \quad (5-2)$$

Les valeurs des coefficients pour chaque variable obtenues à partir de la régression logistique ne nous permettent pas d'interpréter directement l'impact d'une variable sur la probabilité de création d'un marché à terme (Tableau 5-2).

Variable	Coefficient	Ecart-type	z-statistic	Prob
C	-36,4466***	12,73025	-2,862991	0,0042
α_1	2,25834***	0,797135	2,83307	0,0046
α_2	2,485867***	0,88617	2,80518	0,005
McFadden R-squared	0,674746	Mean dependent var		0,245283
S.D. dependent var	0,434372	S.E. of regression		0,250108
Akaike info criterion	0,475601	Sum squared resid		3,127698
Schwarz criterion	0,587127	Log likelihood		-9,603419
Hannan-Quinn criter.	0,518488	Deviance		19,20684
Restr. deviance	59,0519	Restr. log likelihood		-29,52595
LR statistic	39,84506	Avg. log likelihood		-0,181197
Prob(LR statistic)	0,00000	Total observations		53

Tableau 5-2 Résultat de la régression logistique. Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : calculs de l'auteur

⁹⁵ Les modèles économétrique de type logit sont adaptés à la modélisation d'une variable qualitative. Dans notre situation l'absence de marchés *futures* est codée zéro tandis que sa présence est codée un.

⁹⁶ Les variables sont linéarisées car cela réduit leur dispersion importante. Par ailleurs, les critères d'informations nous conduisent à favoriser ce type de spécification.

Le coefficient attaché au terme constant (C) est égal à -36,45, tandis que les coefficients estimés pour les variables production et prix sont proches et atteignent respectivement 2,26 et 2,47. Les signes des coefficients sont cohérents avec la théorie puisque l'augmentation du prix ou de la production d'un métal accroît le risque lié à l'incertitude dû à l'absence de marché à terme et par conséquent favorise la création d'un marché à terme. Le prix et la production d'un métal donné semble influencer de façon notable la présence d'un marché à terme puisque toutes les variables sont significatives au seuil de risque de 1%. De cette manière, la probabilité que le marché de l'or dispose d'un marché à terme en fonction de ses caractéristiques est par exemple égale à :

$$P_{or} = \frac{e^{C+\alpha_1 \times \ln(2560)+\alpha_2 \times \ln(40000)}}{1 - e^{C+\alpha_1 \times \ln(2560)+\alpha_2 \times \ln(40000)}} = 99,95\% \quad (5-3)$$

Nous pouvons aussi délivrer une interprétation des coefficients c , α_1 et α_2 grâce au « odds ratio » qui nous fournit un rapport des chances. Ce rapport des chances exprime quel est le rapport entre la probabilité de succès (détenir un marché à terme) et la probabilité de non succès (ne pas en détenir). Les *odds ratio* peuvent être obtenus grâce au passage des coefficients des variables en exponentielle. Si on s'intéresse à la constante, un rapide calcul nous donne la probabilité qu'un marché détienne un marché à terme alors que la production du métal et du prix soit à zéro. La probabilité d'apparition d'un marché à terme quasi nulle ($1,5 \times 10^{-16}$) dans ces conditions n'est pas surprenante et ne fait qu'appuyer une évidence : un marché spot quasi inexistant ne génère pas de risque et donc n'a pas besoin de marché à terme. Plus intéressant, l'exponentielle des coefficients α_1 et α_2 peut nous permettre de déduire l'effet d'accroissement d'une unité du logarithme de la production ou du prix. De cette manière, une unité du logarithme de la production multiplie le rapport des chances par près de 9,56 et par près de 12 pour une variation unitaire du logarithme du prix. Cet impact important d'une faible variation des variables sur le rapport des chances ne doit pas masquer l'importance des variations nécessaires de la production et du prix pour faire varier le logarithme du prix ou de la production d'une unité. Au point moyen, un accroissement d'une unité de logarithme de la production implique une hausse de 20 800t et une hausse du prix de 160\$ par kg. La notion d'élasticité est plus pertinente car elle représente un rapport de variations relatives entre deux grandeurs. L'élasticité d'un modèle logistique n'est pas constante et sa valeur dépend du point où elle est estimée. Au point moyen⁹⁷, l'élasticité de la probabilité d'apparition d'un marché à terme par rapport à la production atteint 2,35 et 2,52

⁹⁷ Le point moyen de la population représente une production de 12700t et un prix de 92\$ par kg, ce qui correspond *grosso modo* à la situation du lanthane ou du cérium.

pour le prix. Autrement dit, au point moyen, une augmentation de la production de 1% accroît la probabilité de présence d'un marché à terme de 2,35%. L'évolution de la probabilité de présence d'un marché à terme en fonction des valeurs prises par la production et le prix du métal peut être représenté par une surface en trois dimensions (Figure 5-1).

Le R^2 de McFadden est relativement élevé puisqu'il atteint 67%. La probabilité que le modèle ne soit pas globalement significatif est quasi nulle (LR statistic) ce qui conforte les résultats précédents. Le test d'ajustement du modèle de Hosmer-Lemeshow souligne également la qualité de la spécification du modèle⁹⁸.

Les prédictions fournies par le modèle sont aussi de bonne qualité puisque l'erreur de prédiction est égale à 7,55% à un seuil de succès de 50%⁹⁹. L'erreur de prédiction calculée sur l'espérance des probabilités estimées par le modèle permet de s'affranchir d'hypothèses arbitraires de seuil de succès. Cette mesure indique une erreur de prédiction égale à 11,51%¹⁰⁰ soit une prévision correcte du modèle dans 88,49% des cas.

Les erreurs de prédictions visibles sur le Tableau 5-3 proviennent de deux types d'erreurs : celles indiquant une sous-estimation de l'apparition d'un marché à terme (case en haut à droite), et celles générées au contraire par une surestimation de cette apparition (case en bas à gauche). Les surestimations du modèle s'expliquent par des métaux dont la production et le prix sont très fortement contrôlés par la Chine (néodyme) ou dont les qualités sont trop disparates (manganèse). A l'opposé, nous pouvons penser que les sous-estimations du modèle mettent en lumière d'autres facteurs historiques, à savoir un rôle majeur historique déclinant (étain) et un rôle futur majeur en pleine expansion (cobalt)¹⁰¹.

⁹⁸ La statistique de Hosmer-Lemeshow est ici égale à 0,48 et suit un chi-deux à 8 degrés de liberté. Ici, nous ne rejetons pas l'hypothèse d'adéquation du modèle car le p-value associée au chi-deux est supérieure à 5% (p-value=0,99).

⁹⁹ On considère ici que le modèle prédit la présence d'un marché futur pour un métal dès lors que la probabilité d'apparition est supérieure à 50%.

¹⁰⁰ Pour obtenir cette valeur, il suffit de sommer les erreurs réalisées par le modèle : $\sum_i^n (1 - p_i)$.

¹⁰¹ La production d'étain n'a crû que d'environ 1% par an entre 1990 et 2010 (voire décline même depuis 2010) tandis que le cobalt connaît une progression de 5,2% par an depuis 20 ans.

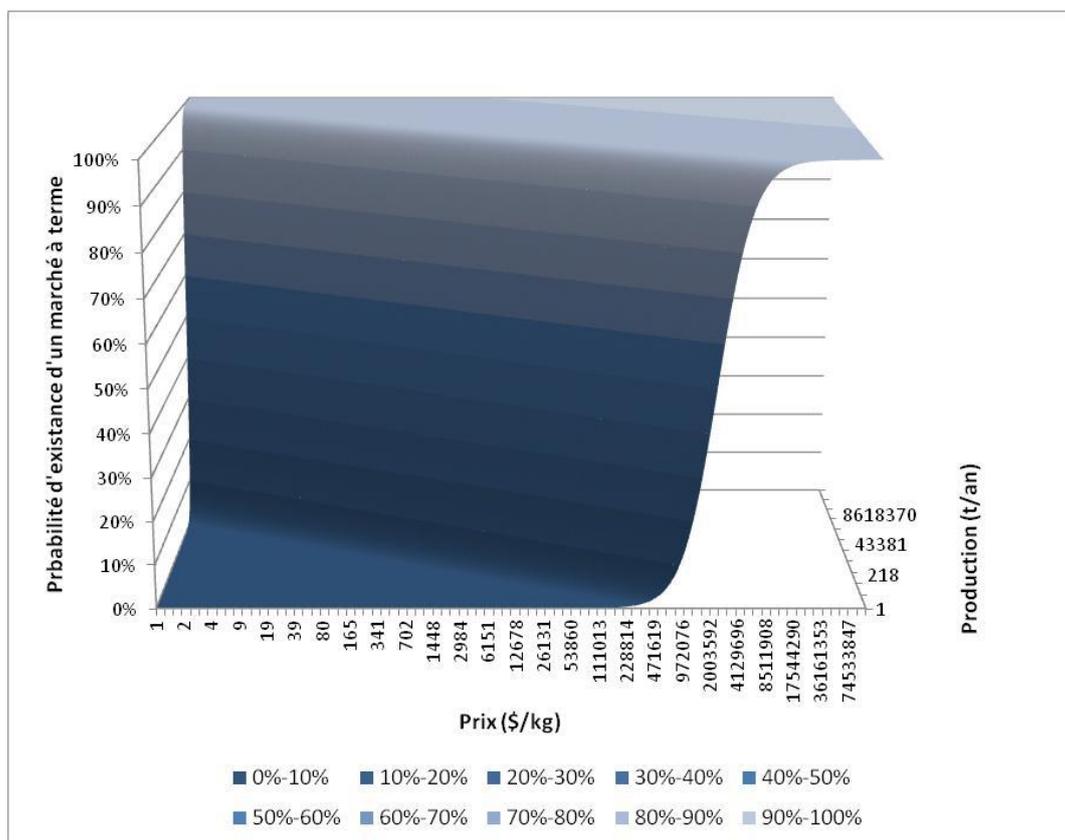


Figure 5-1 Evolution de la probabilité d'apparition d'un marché à terme en fonction des valeurs des variables. Source : calculs de l'auteur

		Prévu		Total
		Mo=1	Mo=0	
Observé	Mo=1	38	2	40
	Mo=0	2	11	13
	Total	40	13	53

Tableau 5-3 Erreur de prévision du modèle au seuil de succès de 50%. Source : calculs de l'auteur

Nous pouvons cependant mettre en doute les qualités de prédiction du modèle fondées sur les seuls chiffres fournis ci-dessus car l'erreur de prédiction est estimée sur des données identiques à celles utilisées pour l'estimation du modèle. En effet, cette qualité d'estimation peut provenir d'un sur-apprentissage de l'échantillon disponible. La méthode de validation croisée est un bon moyen de vérifier si la qualité de prédiction d'un modèle ne survient pas d'un sur-apprentissage (« *overfitting* ») du modèle sur l'ensemble des données. La méthode de validation croisée consiste en une division des observations en K parties aléatoires. Une partie est mise de côté pour évaluer l'erreur de prédiction tandis que les K-1 autres parties représentent l'échantillon d'apprentissage du modèle. Dans notre cas, nous avons fixé K à 10, un nombre souvent usuel dans la littérature. Dans chaque situation on relève l'erreur de

prédiction et on répète cette opération un grand nombre de fois¹⁰². Les résultats indiquent que l'espérance de l'erreur de prédiction est égale à 11,77% avec un écart type de plus ou moins 1,8%. Il semble par conséquent que le modèle soit relativement peu sensible au phénomène de sur-apprentissage et que ses qualités de prédiction restent relativement bonnes. Nous ne devons cependant pas conclure que le prix et la production d'une commodité sont les seules causes concourant à la création de marché à terme mais plutôt que ces variables sont d'assez bonnes approximations de l'effet d'autres variables. L'observation des erreurs de prédiction du modèle apparaît à ce titre comme assez instructive, car elle signale une erreur de prédiction assez importante sur des observations dont la probabilité d'apparition d'un marché intermédiaire est moyenne (entre 20 et 80%). Autrement dit, le modèle ne se trompe pas ou peu sur l'existence ou l'absence d'un marché à terme dans le cas de marché de métaux très importants ou très réduits. Au contraire, il semble décrire assez mal la phase de transition entre ces deux états à l'aide seulement du prix et de la production physique du métal. Le modèle atteste donc de différences fondamentales entre l'économie des métaux de base ou précieux et celles des métaux rares. Il renseigne peu par contre sur les variables de déclenchement de la création d'un marché à terme et surtout sur le seuil de déclenchement.

Compte tenu des résultats du modèle, il apparaît clairement qu'un certain nombre de métaux mineurs ne connaîtront pas de développement de marché à terme car cela nécessiterait un accroissement de leur taille de marché d'une valeur sans précédent (Figure 5-2).

¹⁰² En l'occurrence, ici plus de 500 fois.

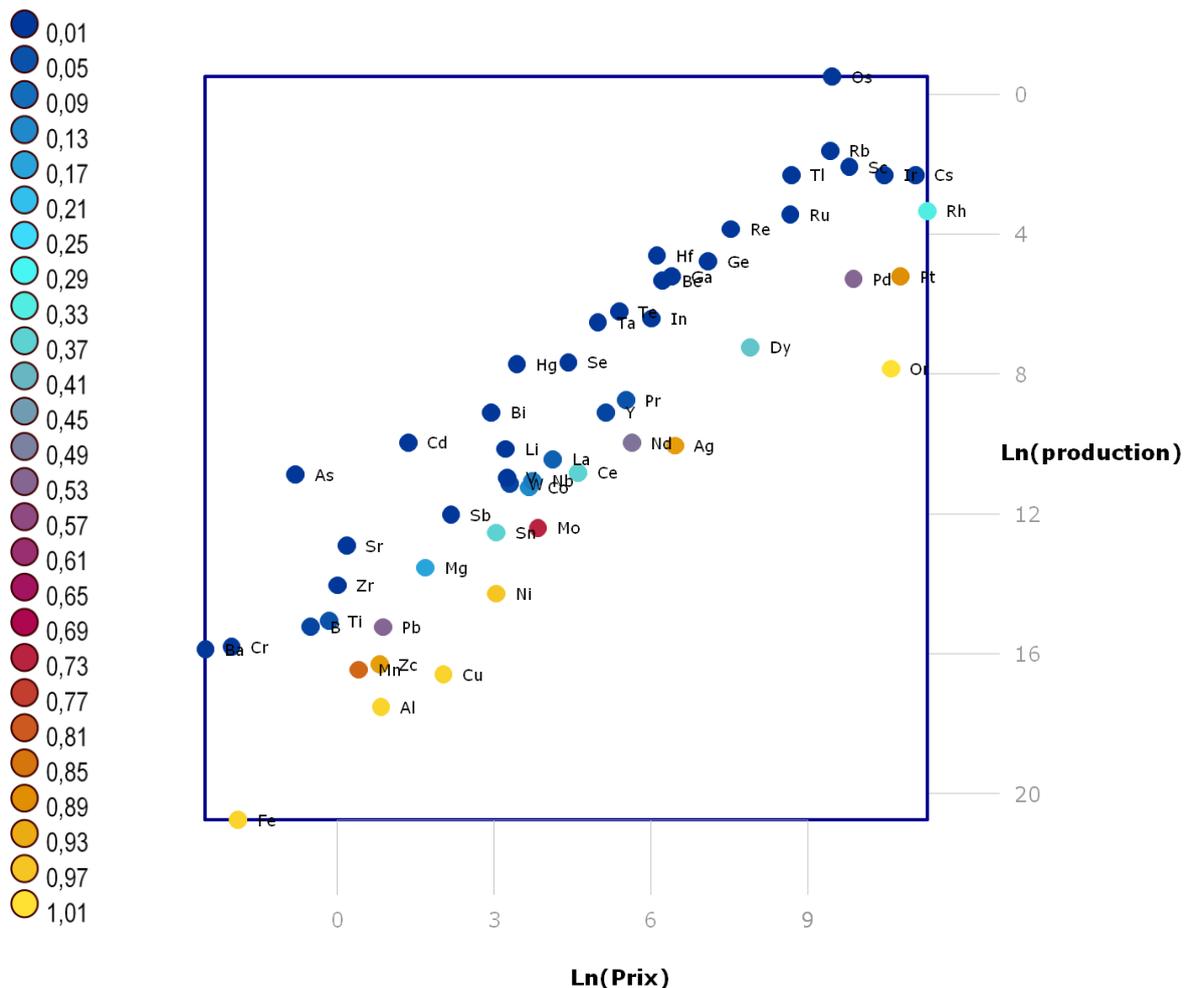


Figure 5-2 Position des métaux en fonction du prix et de la production et probabilité de présence de marché à terme associée. Source : calculs de l'auteur

3 Conséquences d'une absence de marché à terme sur le profil optimal d'extraction d'une ressource épuisable

3.1 Des conséquences théoriques incertaines encore discutées

Il existe en réalité peu de littérature académique sur les conséquences de l'absence de marchés futures d'une commodité sur son profil optimal d'extraction. Un ouvrage généraliste d'économie des ressources naturelles comme Perman et al. (2011, p.529) souligne que l'extraction optimale d'une ressource épuisable en situation de concurrence nécessite deux hypothèses : (1) Les ressources doivent être détenues par des agents compétitifs, (2) Chaque agent doit connaître à chaque échéance future les prix spots et les prix futurs. Ceci requiert que les agents possèdent une vue parfaite du futur. En l'absence de cette vue parfaite, les agents doivent avoir connaissance des prix spots et de l'ensemble des prix futurs, sinon il

n'existe pas de garantie de décision de production rationnelle. Certains auteurs font référence à cette problématique comme Solow (1974), Stiglitz (1979) et Slade (1992) et proposent des résultats possibles à ce type d'hypothèse sans toutefois rentrer dans les détails et sans formaliser leurs arguments.

Pour commencer, Solow (1974, p.6) bien qu'acceptant le résultat d'efficience d'Hotelling, exprime des doutes à propos du fonctionnement des marchés futures, de la formation des anticipations, et du transfert du bien être entre les générations :

« The flow market that has to be cleared is not just one market; it is the sequence of markets for resource products from now until the date of exhaustion. It is, in other words, a sequence of futures markets, perhaps a long sequence. If the futures markets actually existed, we could perhaps accept the notion that their equilibrium configuration is stable; [...] But there clearly is not a full set of futures markets; natural-resource markets work with a combination of myopic flow transaction and rather more farsighted asset transactions. It is legitimate to ask whether observed resource prices are to be interpreted as approximations to equilibrium prices, or whether the equilibrium is so unstable that momentary prices are not only a bad indicator of equilibrium relationships, but also a bad guide to resource allocation. »

Il encourage néanmoins (via ses préconisations de politiques économiques) à la création de marché *futures* pour les ressources naturelles, mais avec des termes plus longs que les marchés *futures* existant alors¹⁰³, afin de réduire le risque de déviation importante du prix par rapport à son chemin intertemporel optimal et de renforcer la stabilité des marchés attachés à ce dernier (Solow, 1974, p.13).

De la même manière, Brown et Field (1978) remarquent qu'en l'absence de marché *forwards*, les traders en ressources naturelles doivent former leurs propres anticipations du prix futur. Par conséquent, si les traders sont averses au risque, la consommation de la ressource est trop rapide et favorise le présent immédiat.

D'une autre façon, Stroup et Baden (1979) expriment leurs désaccords avec Solow sur l'impact de l'introduction de *futures* sur le marché d'une matière première. D'après Solow, les marchés *futures* en permettant une bonne représentation du futur conduisent à une sauvegarde

¹⁰³ C'est-à-dire des marchés *futures* permettant d'établir des transactions sur les ressources naturelles avec des échéances plus éloignées qu'alors.

des ressources. Au contraire, les auteurs estiment que l'unique possibilité des spéculateurs en l'absence de marchés *futures* se résume à parier sur l'accroissement du prix de la ressource. Avec des contrats *futures* les spéculateurs peuvent également vendre à découvert les ressources dont la valeur est anticipée à la baisse, ce qui déprime le prix actuel et encourage une plus grande consommation de la ressource, contredisant du même coup l'hypothèse de sauvegarde des ressources.

Pour continuer, Stiglitz (1979) remarque que l'absence de marché futures et de marché du risque a pour conséquence d'obliger les investisseurs à supposer des prix futurs donc à absorber les risques associés à l'incertitude. Il existe donc une tendance à la surconsommation ou à la sur-conservation de la ressource en cas d'erreurs systématiques attachées à la prévision des prix futurs. Stiglitz attire l'attention sur trois problèmes particuliers :

- Si un individu anticipe une sous-estimation du prix de la ressource par le marché, il va acheter la ressource pour la revendre dans le futur (lorsque la véritable rareté sera reconnue) et en tirer un taux de rendement positif. Au contraire, s'il estime que le prix de la ressource est trop élevé, il peut s'engager à livrer dans le futur via des contrats de long terme. Pour cette seconde possibilité, il n'existe pas nécessairement de contrat de long terme pour la ressource. Ces deux situations présentent toutefois des difficultés. La rupture ou l'abondance de la ressource doit survenir au cours de la durée de vie de l'individu sinon il ne peut tirer bénéfice de son positionnement. En réalité, l'erreur ne peut jamais transparaître dans le prix. Si le prix de départ est trop faible, le prix futur peut devenir infini. A l'inverse si le prix de départ est trop élevé, l'économie n'utilisera pas toute la ressource. Une efficacité de court terme peut donc être accompagnée d'une politique de surconsommation d'un temps fini ou une politique de sur-conservation pour toujours. Il n'est pas clair toutefois dans quel sens agit principalement le biais.
- La situation peut ne pas être un optimum de Pareto lorsque l'information doit être acquise. Les dépenses pour obtenir cette information peuvent être trop importantes (duplication) ou au contraire trop faibles (l'information peut être partiellement un bien public).
- La plupart des marchés de ressources naturelles sont caractérisés par une forte volatilité et cette volatilité peut être la conséquence de l'absence de marchés *futures*. Stiglitz avance l'hypothèse que l'ajustement des prix ne s'établit pas correctement. L'équilibre sur le marché requiert que l'évolution attendue du prix de la ressource doit

être égale au taux d'intérêt du marché. Si pour quelque raison que ce soit, le prix monte à un taux légèrement plus rapide que le taux d'intérêt, on peut s'attendre à deux effets : d'une part les individus anticipant la prolongation de ce taux supérieur dans le futur vont réduire leur production et accroître encore davantage le prix, ce qui en l'absence de marché futur va déstabiliser encore davantage le marché. D'autre part, la réduction de l'offre en matières premières va provoquer une baisse du taux d'intérêt si la ressource et le capital sont des biens complémentaires dans la production. Donc la différence entre le taux d'accroissement du prix de la ressource attendu et le taux d'intérêt du marché va encore s'accroître renforçant ainsi l'instabilité (Stiglitz, 1974).

Il faut rajouter à cela, le discours de Kanafani (2000) signalant que les industries extractives réclament de grands investissements en capital hautement spécialisé et irréversible s'établissant sur une durée longue et bénéficiant de fortes économies d'échelle. Comme la demande pour les ressources naturelles est aussi largement inélastique, l'ensemble de ces conditions le conduit à conclure que de faibles erreurs d'anticipation sur le prix peuvent mener à des effets dramatiques sur l'offre future.

Enfin, Slade (1992) rappelle que la théorie standard d'Hotelling suppose qu'il existe un marché pour chaque commodité et pour chaque période de temps. Un marché avec une infinité de contrats futurs pour être considéré comme Pareto optimal dans l'allocation du risque. Cependant, c'est une hypothèse très forte et la plupart des marchés n'ont pas de marchés *futures* tandis que les marchés de commodités bénéficiant de *futures* ne s'établissent pas sur des périodes de plus de 36 mois. Il existe donc d'après l'auteure deux solutions possibles, augmenter les durées des contrats, or elle rappelle que la théorie de l'optimum de second rang a montré que l'ouverture d'un nouveau marché peut réduire le bien être dès lors que le marché général reste incomplet. Une seconde possibilité repose sur l'établissement d'un contrat de long terme¹⁰⁴ en substitution à une séquence de contrats *futures* de court terme. Dans une situation où les marchés sont parfaits, un contrat de long terme est équivalent à un contrat de court terme roulé sur la période continument. Dans la réalité, toutefois, il peut exister une différence de risque provenant de la mise en place d'une couverture sur le marché *futures* appelée risque de base¹⁰⁵, cela correspond à l'écart de prix entre le contrat vendu et le contrat acheté lorsque le roulement de positions a lieu. De plus, s'il existe un besoin de

¹⁰⁴ C'est-à-dire un contrat *forwards*.

¹⁰⁵ Auquel il faudrait rajouter les coûts de transaction.

lissage de la consommation, la théorie des contrats a démontré que les contrats de court terme et de long terme apparaissent alors comme non équivalents. Les matières premières minérales sont stockables et donc les stocks peuvent aider à lisser la consommation. Néanmoins, il peut exister des périodes d'interruption d'approvisionnement plus ou moins longues. Cela signifie que les contrats de court terme ne conduisent pas à une allocation optimale de la consommation.

D'autres auteurs ont fait le choix de formaliser leurs hypothèses sous la forme de modèle plus ou moins développés (Heal, 1975 ; Dasgupta et Heal, 1979 ; Lasserre, 1991).

3.2 Les modèles théoriques construits sur la question

Le premier modèle sur la question est élaboré par Heal (1975). D'après Heal, dans des circonstances idéales associées à un marché parfait, une rumeur courant sur une rupture d'approvisionnement future et donc à une envolée des prix futurs conduit à une augmentation des stocks de ressources par les vendeurs tandis que la demande réduit son utilisation et substitue la ressource. Cela provoque donc une baisse de la demande future et une hausse de l'offre future, ce qui réduit considérablement le risque de pénurie. Toutefois sans marché *futures*, les décisions des agents reposent uniquement sur les anticipations. Si les vendeurs pensent que cette hausse future du prix est durable, ils vont réduire leur offre aujourd'hui pour vendre davantage demain. Au contraire, si ils estiment que cette hausse n'est pas un phénomène naturel (au dessus du prix normal ou des fondamentaux), ils peuvent profiter de cette rapide augmentation du prix actuel, en vendant aujourd'hui pour faire davantage de profits. Les attitudes face au risque rentrent également en ligne de compte. Si on ne sait pas si les prix futurs vont réellement monter, les plus aversees au risque préféreront vendre à prix élevé aujourd'hui tandis que les plus risquophiles garderont leur stocks pour les vendre plus tard. Le modèle de Heal est d'abord construit dans un cadre où les anticipations sont considérées comme données, elles sont exogènes. Dans cette configuration, il parvient à des prix convergeant vers un équilibre. Au contraire dans un second modèle, l'auteur suppose que l'évolution des anticipations dépend également du prix actuel et de sa différence avec les anticipations plus un second terme égal à l'inverse du R/P. Si le ratio diminue les anticipations de prix à la hausse augmentent. Ce système ne conduit à un équilibre que lorsque la ressource est épuisée et les prix infinis. Ce modèle peut provoquer des variations importantes du prix et de la production. Il est aussi très sensible aux valeurs des paramètres de l'équation des anticipations. La troisième phase du modèle suppose l'introduction du taux d'intérêt pour prendre en compte la possibilité d'arbitrage. Si les évolutions d'anticipations du

prix futur passe sous le taux d'intérêt, les agents vendent la ressource et placent l'argent au taux du marché. Ce modèle est exprimé en rendement. Heal parvient à deux types de comportement selon que l'élasticité de la demande soit inférieure (1) ou supérieure (2) à un mixte d'élasticités de l'offre par rapport au taux d'intérêt, à l'évolution du prix actuel et du taux d'intérêt. Dans le cas (1), il existe un équilibre mais très instable et divergeant selon que l'évolution du prix anticipé sont légèrement supérieure ou inférieure au taux optimal. Dans le cas (2), au contraire dans la situation suivante l'équilibre est convergeant vers le niveau optimal d'anticipation d'évolution du prix futur.

Un second modèle est aussi proposé par Dasgupta et Heal (1979)¹⁰⁶. Une formalisation de la règle d'arbitrage ou « myopic rule » y est développée. Cette règle implique que le rendement d'un actif disponible à différentes dates doit être égal au taux d'intérêt. En l'absence de marchés *futures*, (sauf si les prix futurs sont connus avec certitudes ou que les traders peuvent prédire le prix de manière satisfaisante), les agents souhaitant vendre ou acheter à des échéances futures prennent un risque. En effet, les équilibres futurs du prix de la ressource vont dépendre des décisions des agents reposant elle-même sur leurs anticipations. Or, il est très improbable que les anticipations des agents se révèlent correctes une fois parvenues à l'échéance. Rien n'assure donc que les décisions des agents fondées sur leurs anticipations soient compatibles entre elles, ce qui est indubitablement source d'inefficience. Le prix actuel de la ressource assure un équilibre entre l'offre et la demande mais l'absence de prix futurs oblige les agents à se fonder uniquement sur leurs croyances. En l'absence de marchés *futures*, les agents peuvent être encouragés à former des substituts partiels (intégration verticale et contrats de long terme). L'intérêt de cette théorie pourrait être de localiser d'éventuel biais dans le chemin d'extraction optimal d'une ressource suite à la violation de l'hypothèse de présence de marchés à termes. Il est toutefois difficile de déterminer le sens de ce biais (surexploitation ou sous-exploitation de la ressource). Le chapitre huit de l'ouvrage est dédié à la construction d'un modèle représentant une économie à trois facteurs : du capital (K), du travail (L), des ressources naturelles (R) et supposant la présence de progrès technique. Ces trois types d'inputs permettent de générer des biens via une fonction de production de type Cobb-Douglas à rendements d'échelle constants. L'économie ne peut être initiée qu'à certains points précis, dépendant principalement, du niveau de production par unité de capital ainsi que des dotations en ressources naturelles et en capital de l'économie. Les auteurs montrent que sous l'hypothèse de prédiction parfaite des prix par les agents, il

¹⁰⁶ Nous avons repris le modèle en détail et l'avons approfondi avec de nouvelles hypothèses dans l'annexe 5.1.

n'existe qu'un seul chemin localement et intertemporellement efficient. Cette hypothèse est d'autant plus ténue que n'importe quel point de départ se situant en dessous ou au dessus du point optimal conduit à faire diverger le chemin de consommation vers une situation non optimale. En cas d'un niveau de production par unité de capital trop élevé, l'économie part d'un point où elle surconsomme les ressources naturelles et où le prix initial attaché à celles-ci est trop faible conduisant à un épuisement trop rapide. Au contraire, en cas d'un niveau de production par unité de capital trop faible, l'économie part d'un point où elle sous-consomme les ressources naturelles et où le prix attaché à celle-ci est trop élevé concourant à un épuisement incomplet de la ressource. Une seconde phase du modèle souhaite reprendre les ingrédients du premier modèle en supposant des anticipations adaptatives avec un signal prix puis un signal quantités. Tous les chemins sont localement inefficients puisque les agents font des erreurs de prédiction. Toutefois, les solutions convergent vers un équilibre de long terme dans le second cas alors que le premier cas implique une divergence possible de l'équilibre optimal à long terme. Les auteurs se demandent enfin si la possibilité d'une violation de la règle d'arbitrage¹⁰⁷ tend à renforcer le déséquilibre ou au contraire se corrige d'elle-même. Cette hypothèse a été explorée dans une extension de leur modèle (voir annexes 5.1) avec des anticipations adaptatives dépendant à la fois des erreurs de prévisions constatées par les agents et de la différence entre le taux d'intérêt du marché et le l'évolution du prix de la ressource. Cette hypothèse supplémentaire ne modifie pas les conclusions précédentes de Dasgupta et Heal, le modèle offre un comportement de divergence si on ne se situe pas exactement le chemin optimal. Un point d'initiation de l'économie supérieur au chemin optimal conduit à une explosion de la consommation de la ressource donc un à épuisement trop rapide de la ressource tandis qu'un point initial trop faible conduit à une extinction de la consommation de la ressource donc à une sur-conservation de la ressource par rapport à l'optimum.

Enfin Lasserre (1991, p.13-15) offre un troisième type de modèle. Dans ce dernier, un équilibre compétitif assure une allocation intertemporelle optimale des ressources sous certaines conditions avec entre autre, l'existence d'un marché à terme complet. Si un agent peut négocier sa ressource maintenant pour n'importe quelle date future, il a l'information nécessaire pour calculer la valeur d'une unité de ressource à une date précise et la comparer à une autre date. En l'absence de marchés *futures*, les entreprises doivent prendre leurs

¹⁰⁷ La règle d'arbitrage suppose que les agents anticipent que l'évolution du prix de la ressource sera égale au taux d'intérêt.

décisions en fonction de leurs anticipations. Cette dernière hypothèse implique qu'il puisse exister une séquence d'équilibres momentanés non efficace à long terme. Autrement dit, l'efficacité de court terme ne mène pas à l'efficacité de long terme. Contrairement à Stiglitz, Dasgupta et Heal, Lasserre corrobore la possibilité d'une surconsommation ou d'une sous-consommation de la ressource par rapport au chemin optimal suite à la myopie des agents, mais cela ne peut pas continuer indéfiniment jusqu'à l'épuisement de la ressource car il existe des signaux qui - une fois la rente de rareté parvenue à un stade extrême - indiquent à ces derniers qu'ils ne se situent pas sur le chemin optimal. Dans un contexte Ricardien¹⁰⁸, deux hypothèses peuvent conduire à une divergence par rapport à une situation optimale où les agents évaluent correctement la rente de rareté actuelle et future de la ressource. Une première situation existe lorsque les agents estiment qu'une ressource est plus rare qu'elle ne l'est vraiment, ils anticipent donc une évolution de sa rente de rareté plus rapide. Cette évolution conduit à sur-conserver la ressource et à éteindre la demande avant d'avoir épuisé la totalité des réserves. Mais les agents s'aperçoivent alors qu'il existe encore des réserves exploitables à un coût inférieur au prix actuel de la ressource, les poussant à abaisser la rente de rareté et à revenir vers le chemin optimal. Une seconde possibilité diamétralement opposée, suppose que les agents sous-évaluent la vraie rareté de la ressource et anticipe une évolution plus faible de la rente de rareté. Cette situation conduit à une surconsommation de la ressource par rapport à l'optimum. Lorsque la rente de rareté s'annule avant l'épuisement complet des réserves, les agents constatent qu'il existe encore des gisements exploitables à un coût inférieur au prix de marché. Il révisé donc la rente de rareté à la hausse et remonte l'économie sur un chemin plus proche de l'optimum. Toutefois, dans le cas où la ressource est homogène (cas du modèle d'Hotelling), Lasserre reconnaît que le chemin sous-optimal peut alors être indétectable jusqu'à l'épuisement de la ressource.

4 Impact résultant de l'introduction de marché à terme

4.1 Conséquences et littérature liées à l'introduction de marchés à terme

Depuis le 22 février 2010, deux métaux mineurs (le molybdène et le cobalt) disposent désormais de marchés organisés au travers d'une cotation au London Metal Exchange (LME). Loin d'être anodine, cette structuration de leurs marchés confirme le succès rencontré par ces

¹⁰⁸ Dans un contexte Ricardien, la rente de rareté est continuellement décroissante et s'éteint lorsque les gisements d'une ressource égalisent le prix du marché. Tous les gisements donc le coût est supérieur au prix du marché possèdent donc une valeur marginale associée de zéro. On parle alors d'épuisement incomplet.

métaux dans le développement de leurs usages. Depuis le début du XX^{ème} siècle, les productions mondiales du cuivre et du fer ont connu une multiplication par près de 35 (de 495 kt à 17 Mt) et 20 (de 66 Mt à 1,5 Gt). En comparaison, les productions de cobalt et de molybdène ont progressé d'un facteur 600 (de 180 t à 110 kt) et 25000 (de 10t à 250 kt) respectivement. La généralisation de l'usage de ces métaux mineurs aux technologies de pointe (nouvelles technologies de l'énergie, électronique...) ainsi que les volumes monétaires conséquents générés par leurs échanges ont poussé les acteurs à former un marché organisé pour mieux couvrir leur risque. En effet, jusqu'alors ces marchés se caractérisaient par des échanges de gré à gré. Dans ce contexte, l'apparition et le rôle croissant ces dernières années des ETP¹⁰⁹ (ETF, ETC, ETN) représente un risque majeur pour ces micromarchés. En effet, ces fonds concourent à stériliser l'épargne et les stocks, ce qui diminue d'autant l'attrait du financement par action des sociétés minières et rend caduque l'information sur les stocks. Sans compter que les tailles de ces fonds sont suffisamment importantes pour déstabiliser dans leur totalité les marchés comptants et à terme des métaux mineurs (Tableau 5-4 et Tableau 5-5). Or, si les tentatives de corner ou d'accaparement ont dans le passé été assez nombreuses¹¹⁰, elles ont échoué la plupart du temps, faute d'un contrôle suffisant sur les industries productrices de la commodité et d'une discrétion suffisante pour que la manipulation soit indétectable par les autres participants. Néanmoins, contrairement aux grands marchés comme l'argent, l'or ou le cuivre, les marchés des métaux mineurs intègrent moins d'acteurs et les échanges ont lieu dans une opacité beaucoup plus importante rendant du même coup la lecture des fondamentaux beaucoup moins claire pour l'ensemble des acteurs. Les conditions sont donc remplies pour qu'un acteur puisse manipuler les prix avec relativement peu de moyens et avec une forte probabilité que les autres acteurs ne puissent déterminer si cette nouvelle évolution du prix dépend ou non d'une modification de fondamentaux souvent inaccessibles (peu d'information sur les prix, les productions, les acteurs...). Les récents soupçons de manipulation nourris à l'encontre du système de prix reportés de Platts sur le marché du pétrole ne fait qu'illustrer encore plus l'importance de cette problématique. En effet, le marché du pétrole connaît depuis mai 2013, l'ouverture d'une enquête par la commission européenne pour collusion sur les prix reportés fournis par la Royal Dutch Schell, BP, et Statoil à Platts ainsi que pour tentative d'obstruction dans la

¹⁰⁹ ETP : Exchange Traded Products, ETF : Exchange Traded Funds, ETC : Exchange Traded Commodities, ETN : Exchange Traded Notes. Ces fonds visent à reproduire l'évolution du prix d'une ou plusieurs ressources pour des investisseurs.

¹¹⁰ En particulier, les tentatives de corner des frères Hunt sur le marché de l'argent, de Hamanaka de la compagnie Sumitomo sur le cuivre, et du cartel international de l'étain.

participation au processus de détermination des prix reportés par Platts à l'encontre de différentes compagnies du marché pétrolier¹¹¹ (European Commission, 2013). Cependant, un marché organisé comme le LME ne met pas les agents économiques à l'abri de tentatives de manipulation de marché comme l'a montré également l'ouverture d'un procès contre Goldman Sach (premier actionnaire du LME) et le LME pour abus de position dominante, hausse artificielle des prix et dégradation du service associé au stockage de l'aluminium (Reuter, 2011).

Abréviation	ETF	Encours M\$
GLD	SPDR Gold Trust	40444
DBC	DB Commodity Index Tracking Fund	5723
DBB	PowerShares DB Base Metals Fund	276
DBP	PowerShares DB Precious Metals Fund	231
NYSE REMX	Market Vectors Rare Earth/Str Metals ETF	122,6
SLV	iShares Silver Trust	7,8
NYSE LIT	Global X Lithium Etf	4

Tableau 5-4 Taille de différents ETF spécialisés sur les métaux (valeurs des actifs sous gestion)

Métal	Taille du marché physique M\$
Or	142000
Cuivre	121500
Argent	22400
Molybdène	7300
Cobalt	3400
Néodyme	1800
Lithium	762
Indium	0,3
Gallium	0,15

Tableau 5-5 Taille approximative des marchés physiques de différents métaux en 2013 (valeurs des transactions physiques). Source : *calculs de l'auteur*

Dans tous les cas, cette rupture dans l'organisation de ces marchés nous fournit l'occasion de soulever plusieurs questions importantes. Quelles types de relations entretiennent les métaux mineurs en émergence avec les métaux majeurs ? La cotation du molybdène au LME a-t-elle modifié sa relation d'équilibre avec d'autres métaux de base ? Les marchés des métaux avec *futures* se caractérisent-ils par un fonctionnement radicalement différent de ceux ne possédant de marché à terme ? Quelles influences les agences d'information des prix peuvent-elles avoir sur la formation des prix lorsqu'un métal bénéficie d'un marché à terme ?

¹¹¹ Par exemple, Pannonia Ethanol accuse Platts d'avoir multiplié les demandes de renseignements pour l'empêcher de participer au processus de détermination du prix reporté.

Une polémique autour des conséquences liées à l'introduction de marchés à terme

Les conséquences attachées à la création d'un marché organisé pour une commodité ont généré une importante littérature académique depuis les années 70. La plupart des auteurs ont cherché à déterminer si les marchés organisés influent ou non sur différents paramètres d'un marché d'une commodité. Un marché à terme remplit plusieurs rôles, celui de découverte du prix et de moyen de transfert du risque (Hernandez et Torero, 2010). La littérature académique s'est portée jusqu'ici sur deux domaines de recherches majeurs : le mécanisme de découverte du prix assuré par les *futures* et l'évolution de la volatilité du marché comptant suite à la création d'un marché à terme. Des travaux empiriques ont montré l'importance de la contribution des marchés *futures* au transfert du risque et à la découverte du prix, en particulier pour le marché du pétrole (Moosa, 2002). D'autres auteurs ont aussi marqué leur intérêt pour cette question et l'ont appliquée aux marchés des commodités agricoles. Par exemple, Baldi et al. (2011) soutiennent dans une analyse économétrique qu'il existe une causalité unidirectionnelle des marchés *futures* agricoles vers les marchés spots agricoles en temps normal tandis que celle-ci seraient bi-causale en période de crise du fait des pressions sur le marché physique de la commodité. Zapata et al. (2005) et Hernandez et Torero (2010) obtiennent également des résultats similaires pour un ensemble de commodités agricoles renforçant ainsi l'hypothèse de découverte du prix par le marché *futures*. Les marchés à terme apportent également de la liquidité et de la transparence au marché d'une commodité en permettant une diffusion plus large et plus importante de l'information mais aussi en accroissant le nombre d'intervenants potentiels. En effet, en favorisant la transmission de l'information, les marchés *futures* facilitent les décisions de production des producteurs non informés et l'accès de l'information aux traders non informés (Kamara, 1982). Cette transmission de l'information d'une manière égalitaire à tous les agents économiques garantit par conséquent la transparence du marché.

L'information constituant une source de modification des prix, certains universitaires (Cox, 1976) estiment que la création d'un marché organisé accentue à la hausse la volatilité des prix en fournissant davantage d'information au marché mais en le rendant toutefois plus efficace. Dans cette même optique, Antoniou et Foster (1992) évoquent la possibilité que les marchés *futures* accroissent les possibilités d'intervention des spéculateurs, ce qui peut résulter dans certaines situations à une sur-amplification des réponses du prix face à une modification des fondamentaux. Ainsi, Yang et al. (2005) démontrent qu'ils existent une relation de causalité du volume de trading non anticipé associé au marché *futures* vers la volatilité du marché spot

et cela pour plusieurs commodités agricoles. Sehgal et al. (2012) ont aussi recueilli des résultats convergeant vers une déstabilisation des marchés spots de sept commodités agricoles par le volume de trading non-anticipé de leurs marchés *futures*. L'immaturation de la plupart des marchés *futures* agricoles étudiés (haricot, curcuma, soja, maïs, graines de ricin, poivre noir) renforce d'ailleurs encore l'intérêt de ces conclusions. Au contraire, d'autres universitaires (Pecks, 1976 ; Netz, 1995 ; Jacks, 2007) soutiennent qu'un marché organisé ne peut que diminuer la volatilité intrinsèque d'une commodité en faisant progresser la visibilité sur le futur, donc en encourageant les phénomènes d'anticipation, de couverture, d'arbitrage, de substitution et d'usage plus efficace du stockage, ce qui évitent les hausses et les baisses brutales de cours pouvant survenir dans une situation d'opacité. De la même manière, l'apparition d'un marché *futures* diminue la nécessité d'introduire un premium dans les transactions spots ce qui réduit la volatilité et les coûts de transaction (Antonioni et Foster, 1992).

A l'inverse, l'opacité d'un marché non-organisé doit probablement pousser les agents économiques présents sur le marché à adopter trois types de stratégies :

- Renforcer l'acquisition d'information sur le marché en achetant ou en s'impliquant dans des structures du côté de l'offre et de la demande du marché, ce qui diminue les coûts de recherche d'information et de contrepartie.
- Réduire l'influence du marché et donc réduire l'incertitude en encourageant l'intégration verticale de part et d'autres de la chaîne de valeur de la commodité ou en développant des contrats de long terme.
- Rechercher et établir des pratiques de couvertures croisées¹¹² sur des marchés similaires disposant d'une structure organisée.

Cette dernière stratégie a de fortes chances de renforcer les corrélations déjà existantes entre deux marchés en produisant des comportements de couverture sur le marché organisé en fonction des besoins sur le marché inorganisé. D'autres auteurs comme Weaver et Banerjee (1990) ont également avancé puis démontré que la création de marché à terme pour une commodité conduit à renforcer sa corrélation avec d'autres commodités du portefeuille. L'inclusion de contrats à terme de différentes matières premières pour des raisons de diversification du risque conduit par conséquent à une hausse des coefficients de corrélation entre celles-ci. Les marchés non-organisés restent très vulnérables aux attaques spéculatives

¹¹² Cross-hedging en anglais.

même si leurs relatives opacités maintiennent certainement à l'écart les agents spéculateurs non initiés à leur fonctionnement spécifique.

4.2 Spécificités des marchés organisés du molybdène et du cobalt

Si les taille de marchés du molybdène et du cobalt évoluent plus rapidement que les métaux majeurs (cuivre, fer, aluminium...), ces premiers sont encore très loin d'atteindre la taille des marchés des métaux majeurs. Le cobalt s'approche d'une valeur générée de 3 G\$ par an et le molybdène de 7 G\$ par an, très loin de l'aluminium ou du cuivre (respectivement 93 et 122 G\$ par an). Sans surprise, l'information et la connaissance du fonctionnement des marchés de ces métaux mineurs est plus imparfaite que celles des grands marchés. Une analyse de la structure de l'offre du cobalt et du molybdène révèle un nombre d'acteurs relativement réduit tandis que la demande semble comme plus diversifiée même si les données disponibles ne permettent pas d'identifier les acteurs propres à celle-ci (Figure 5-3). L'intégration verticale demeure relativement limitée puisqu'elle se cantonne à certains groupes japonais (Sumitomo), allemands (Cronimet) ou belges (Umicore) dont les parts de marché restent marginales. Concernant l'organisation des deux commodités, après trois années de fonctionnement, les marchés à terme du cobalt et du molybdène apparaissent comme relativement immatures avec des volumes de transactions échangés faibles en absolu et en relatif. Ainsi en 2013, les transactions échangées sur le molybdène et le cobalt au LME ne représentent que 1% et 13% des volumes physiques tandis que les volumes de *futures* échangés pour le nickel atteignent 43 fois la valeur des transactions physiques. Les volumes stockés ne sont par conséquent pas les mêmes non plus. Le zinc et le nickel disposent de stocks au LME équivalents à environ 10% de leurs productions mondiales annuelles (environ 35 jours de consommation) tandis que le cobalt et le molybdène ne disposent que de stocks très faibles, équivalents à 0,4% et 0,04% de leurs productions mondiales annuelles (respectivement 1,5 jour et 4h de consommation). Autre fait marquant, la fourchette de cotation¹¹³ atteint des niveaux relatifs beaucoup plus élevés que pour les marchés *futures* classiques. A titre d'exemple, en octobre 2013, la fourchette de cotation atteint 5\$ par tonne pour le nickel (soit 0,04% de son prix), et 2\$ par tonne pour le cuivre (soit 0,03% de son prix). *A contrario*, la fourchette de cotation du cobalt atteint 1000\$ par tonne (soit 3,8%) et 500\$ par tonne pour le molybdène (2,5% de son prix). Il faut également noter que le fonctionnement du London Metal Exchange demeure particulier par l'absence d'échéance fixe pour le prix futur du cobalt et du molybdène. Cela signifie que

¹¹³ *Bid-ask spread* en anglais.

l'échéance des contrats *futures* à trois mois est continuellement roulée vers un terme plus lointain.

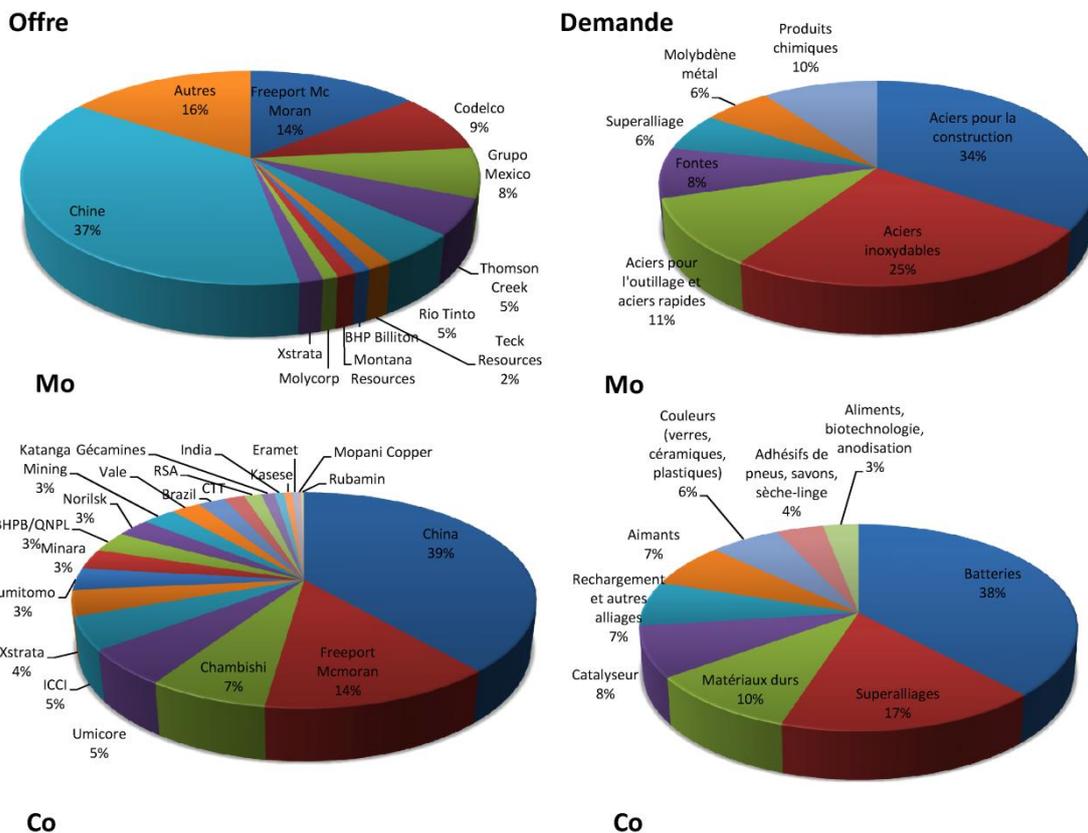


Figure 5-3 Structure de l'offre et de la demande du molybdène et du cobalt. Source : données de l'International Molybdenum Association et du Cobalt Development Institute, calculs de l'auteur

Au final, le molybdène et le cobalt détiennent deux spécificités particulières. Tout d'abord, ils appartiennent à la classe des métaux mineurs. On remarquera d'ailleurs que le cobalt reste majoritairement issu d'une production en tant que sous-produit du nickel et du cuivre à plus de 96% tandis que la situation est moins tranchée avec le molybdène dont la production en tant que sous-produit du cuivre ne représente plus qu'environ 50% de sa production mondiale.

Ensuite, le molybdène et le cobalt cadrent avec le concept de marché étroit. Or, il n'existe pas de définition unanime établie sur le concept de marché étroit. Ainsi, Peterson (2005), sans avancer de définition précise du marché étroit, rappelle qu'un marché étroit détient une part marginale du volume total, et que dans ces conditions, le prix établi sur le marché boursier ne reflète pas correctement l'état de l'équilibre entre l'offre et la demande. Il affirme également que l'étroitesse du marché peut causer un excès de volatilité du prix et des coûts de transaction plus élevés du fait d'un risque prix plus élevé. Plus globalement, Rostek et Weretka (2008) définissent un marché étroit comme caractérisé par un faible volume de

transaction, une haute volatilité, une fourchette de cotation élevée, peu de participants (acheteurs et vendeurs), et souvent un fort manque de liquidité. Cette définition reprend en partie la base simple mais toute relative de Hayenga et al. (1978) spécifiant le marché étroit comme un marché disposant de trop peu de transactions par unité de temps. Dans ces conditions, le prix établi sur le marché ne peut que s'éloigner du prix d'équilibre concurrentiel. Anderson et al. (2007) reprochent néanmoins à ces définitions une focalisation sur le critère du volume d'échange et une absence du caractère qualitatif d'un marché étroit. Un marché organisé disposant d'un volume d'échange important peut rester marginal et inefficace si les caractéristiques du produit échangé sur le marché organisé ne représentent pas du tout la qualité des volumes échangés de gré à gré. Le marché est alors qualifié d'étroit même avec un volume de transactions important. Cette étroitesse à son importance, car elle concourt à ce que les positions des traders soient relativement importantes vis-à-vis de la taille du marché, leur procurant un impact sur les prix et alimentant du même coup un excès de volatilité tout en limitant les possibilités d'arbitrage (Rostek et Weretka, 2008). On parle alors de profondeur de marché faible. Cette faible liquidité du marché alimente également un coût de transaction élevé ce qui décourage d'autant en plus le rentrée de nouveaux investisseurs. Certains auteurs soulignent d'ailleurs l'inefficacité de ces marchés étroits relativement aux larges marchés (Aulton et al., 1997).

Nous allons voir dans un second temps que ces spécificités se traduisent par des caractéristiques différentes en termes de volatilité. Des tests effectués sur les coefficients de variations des séries de prix de métaux disposant de *futures* ou n'en disposant pas, montrent sans ambiguïté, une stabilité accrue des métaux bénéficiant de marché à terme (Figure 5-4). Ceci est conforté par une analyse des coefficients de corrélation linéaire (Pearson) et non linéaire (Spearman et Kendall) entre la présence d'un marché à terme et le niveau du coefficient de variation des prix (Tableau 5-6). De la même manière, un test d'égalité des moyennes¹¹⁴ des coefficients de variation entre le groupe sans *futures* et avec *futures* indique clairement que nous pouvons rejeter l'hypothèse de coefficient de variation des prix similaires à un seuil de risque de 1% (Tableau 5-7). Toutefois, il serait hâtif de conclure que cette stabilité soit une conséquence directe de la présence d'un marché à terme. Il y a en effet, d'autres caractéristiques inhérentes aux marchés de métaux disposant de *futures*, en particulier leur taille. L'observation d'une stabilité accrue des métaux disposant de marché à terme

¹¹⁴ Test de Satterthwaite-Welch t-test. Ce test permet de tester l'hypothèse d'égalité des moyennes avec des variances inégales.

pourrait provenir de leur taille supérieure et donc de la diversification de leur débouchés, limitant ainsi la volatilité des prix suite à des modifications de leur demande.

Tests	Coefficient de corrélation
Pearson	-0.597545
t	-2.686934
p value	0.0187
Spearman	-0.629941
t	-2.924488
p value	0.0118
Kendall tau b	-0.531213
p value	0.0216

Tableau 5-6 Coefficient de corrélation entre présence d'un marché *futures* et niveau du coefficient de variation. Source : calculs de l'auteur

Type	Groupe <i>futures</i>	Groupe sans <i>futures</i>	Valeur test	P value	Conclusion
Coefficient de variation	0.197864	0.316615			
Ecart type	0.039018	0.089281			
n	6	11			
Test d'égalité des variances			5.165382	0.0413	Variances inégale
Test d'égalité des moyennes			-3.106286	0.0093	Moyennes inégale

Tableau 5-7 Tests de normalité, d'égalité des variances et des moyennes des coefficients de variation. Source : calculs de l'auteur

Nous pouvons également tester si les coefficients de variation des prix comptants du cobalt et du molybdène possèdent une moyenne significativement différente avant et après l'introduction de leur marché à terme. Pour ce faire, nous calculons les coefficients de variation des prix du molybdène et du cobalt sur une période glissante de six mois¹¹⁵. A l'issue de cette procédure, nous vérifions si les moyennes des coefficients de variation sont significatives différentes entre les deux périodes. Or les tests confirment l'hypothèse d'une baisse de la volatilité suite à l'introduction du marché à terme à la fois pour le molybdène et le cobalt (Tableau 5-8 et Tableau 5-9). Les calculs sont réitérés sur différentes périodes glissantes (un mois, trois mois, six mois) sans impact sur nos conclusions.

¹¹⁵ L'année 2008 a été exclue de la période d'analyse du fait de l'explosion de la bulle des matières premières.

Type	Pré-futures	Post-futures	Valeur test	P value	Conclusion
Coefficient de variation	0.176882	0.049287			
Ecart type	0.049871	0.014717			
n	35	145			
Test d'égalité des variances			11.48315	0.0000	Variances inégales
Test d'égalité des moyennes ¹¹⁴			-14.97968	0.0000	Moyennes inégales

Tableau 5-8 Test d'égalité des moyennes des coefficients de variation pré et post futures pour le molybdène. Source : calculs de l'auteur

Type	Pré-futures	Post-futures	Valeur test	P value	Conclusion
Coefficient de variation	0.095147	0.066835			
Ecart type	0.014618	0.013565			
n	35	145			
Test d'égalité des variances			1.161306	0.6253	Variances égales
Test d'égalité des moyennes			10.91570	0.0000	Moyennes inégales

Tableau 5-9 Test d'égalité des moyennes des coefficients de variation pré et post futures pour le cobalt. Source : calculs de l'auteur

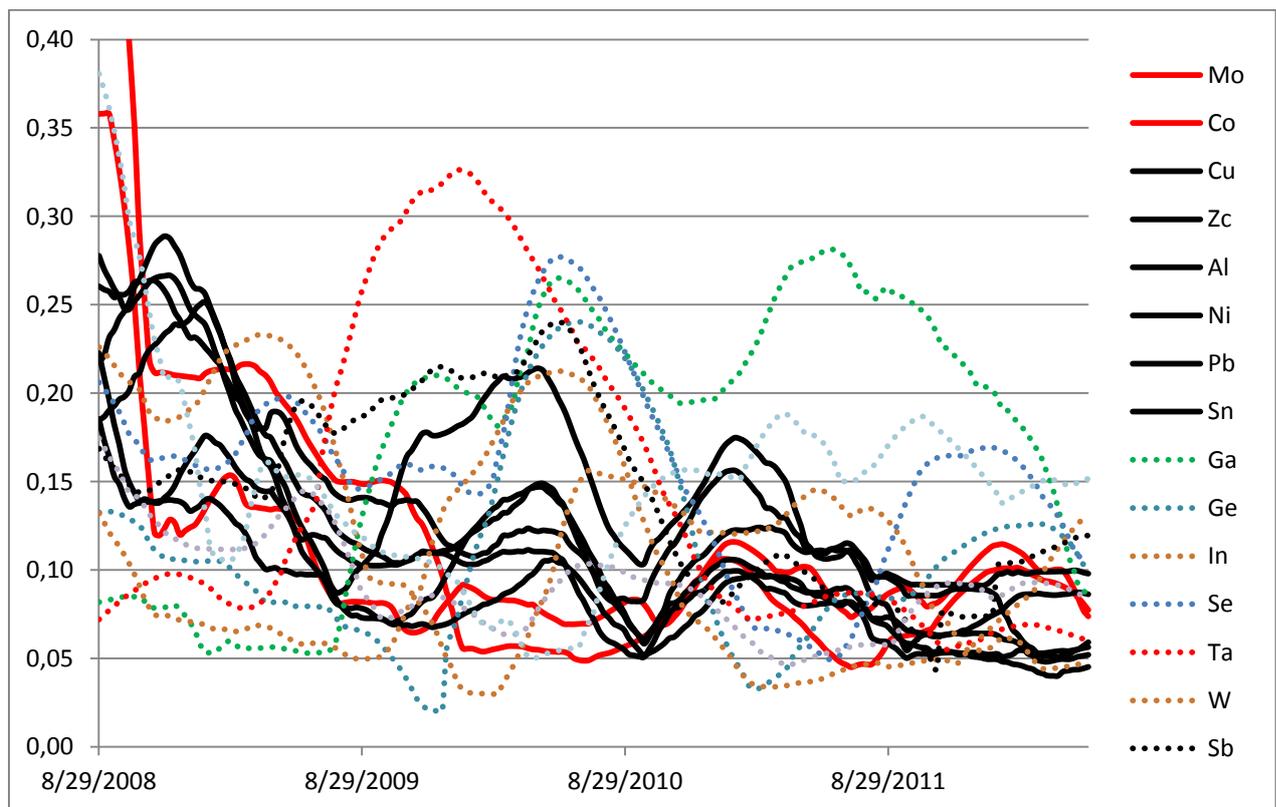


Figure 5-4 Evolution des coefficients de variation des prix de différents métaux entre 2008 et 2013. Source : calculs de l'auteur

4.3 Méthodologie

Les prochaines parties de ce travail seront réalisés sur la base de données de prix hebdomadaires reportés par *Metal Bulletin* pour le molybdène, le cobalt et le nickel sur la période de juin 2008 à septembre 2013. Nous disposons aussi des séries de prix comptants¹¹⁶ et futures établies sur le LME de juin 2008 à septembre 2013 pour le nickel et de février 2010 à septembre 2013 pour le molybdène et le cobalt. L'ensemble des données sont converties dans la même unité (\$/tonne) et nous avons également vérifié la similarité des qualités des sous-jacents. Les données sont également converties en log afin de pouvoir interpréter directement les résultats en termes d'élasticité.

Séries	Abréviation	Période	Unité
Nickel LME spot	Lognispot	30/05/2008 20/09/2013	\$/tonne
Nickel LME 3mois	Lognifu	30/05/2008 20/09/2013	\$/tonne
Molybdène LME spot	Logmospot	21/05/2010 20/09/2013	\$/tonne
Molybdène LME 3mois	Logmofu	26/02/2010 20/09/2013	\$/tonne
Molybdène comptant reporté	Logmomb	30/05/2008 20/09/2013	\$/tonne
Cobalt LME spot	Logcospot	21/05/2010 20/09/2013	\$/tonne
Cobalt LME 3 mois	Logcofu	26/02/2010 20/09/2013	\$/tonne
Cobalt comptant reporté	Logcomb	30/05/2008 20/09/2013	\$/tonne

Figure 5-5 Données utilisées dans les modèles. Source : auteur

Les relations de cointégration mises en lumière ci-après dans l'article s'appuient sur la méthodologie de Johansen (1988) qui consiste à mettre en place un VAR à correction d'erreur (VECM). L'ordre du retard du VECM est choisi de manière à minimiser le critère d'information d'Akaike.

L'usage d'un VECM doit être précédé des tests de cointégration de Johansen qui eux même doivent être devancés des tests de stationnarités de Dickey-Fuller ou de Phillips Perron (1988) afin de vérifier que les séries de prix sont intégrés du même ordre. Le test de racine unité de Phillips Perron peut être réalisé sur trois types de modèles :

- 1) Avec un trend déterministe, une constante, et une racine unitaire.
- 2) Une constante et une racine unitaire.
- 3) Une racine unitaire.

¹¹⁶ Le prix comptant sur le LME est un prix cash débouchant sur la livraison de la commodité deux jours plus tard.

Toutefois comme le suggère Glynn et al. (2007), les tests de racine unitaire traditionnels ont tendance à sous rejeter l'hypothèse nulle de racine unitaire lorsqu'il existe des ruptures dans les données. C'est pourquoi nous réalisons également des tests de racine unitaire avec détection d'une rupture endogène aux données selon la méthode évoquée dans Perron (1997). Les ruptures sont déterminées de manière endogène aux données et selon trois types de spécifications différentes : un changement structurel avec une rupture au niveau de la constante uniquement (IO1 : *innovational outlier*), un changement structurel au niveau de la pente et de la constante (IO2), et une rupture brutale de la pente (AO : *additive outlier*)¹¹⁷.

Par ailleurs, compte tenu de la forte instabilité régnant sur le début de notre période (2008) correspondant à l'éclatement de la bulle des matières premières, nous avons également procédé au test de Gregory-Hansen (1996) autorisant la détection d'une rupture dans le vecteur de cointégration afin d'évaluer la stabilité de la relation. Pour estimer cette rupture nous utilisons le test de Gregory-Hansen qui autorise un changement du vecteur de cointégration entre deux variables. Il offre deux possibilités, une modification du niveau de la constante, donc un changement de niveau, et un changement au niveau de la totalité du vecteur de cointégration (pente et constante). Le test de Gregory et Hansen emploie une variable dichotomique afin de déterminer à la fois la date de la rupture dans la relation de long terme tandis que les résidus de la relation de long terme sont analysés afin de déterminer l'absence ou la présence d'une cointégration. Soit dans notre cas, le modèle 1 avec changement de niveau :

$$Q_{st} = a_{1t} + \varphi_{tt}a_{2t} + bQ_{at} + \varepsilon t \quad t = 1, \dots, n. \quad (5-4)$$

$$\text{Où } \varphi_{tt} = \begin{cases} 0 & \text{si } t \leq [n\tau] \\ 1 & \text{si } t > [n\tau] \end{cases}, \tau \in (0,1)$$

Et le modèle avec changement de niveau et de pente :

$$Q_{st} = a_{1t} + \varphi_{tt}a_{2t} + b_1Q_{at} + \varphi_{tt}b_2Q_{at} + \varepsilon t \quad t = 1, \dots, n. \quad (5-5)$$

Le deuxième avantage de la méthodologie élaborée par Gregory et Hansen repose sur l'absence de postulat sur la date du point de rupture a priori.

¹¹⁷ Pour en savoir plus, se référer à Perron (1997).

En parallèle aux relations de cointégration, nous établissons aussi des réponses impulsionnelles (*Impulse Response Function*) sur les séries de prix en différences premières pour illustrer le comportement dynamique du système de prix suite à un choc sur un des prix étudiés.

Enfin nous effectuons également des tests de causalité afin d'identifier l'existence et le sens d'une éventuelle causalité. Il existe plusieurs tests de causalité qui reposent tous sur des définitions différentes de la causalité. L'idée du test de causalité de Granger (1969) consiste à vérifier si le rajout des données passées de la variable Y en plus du passé de la variable X, permet d'expliquer les données présentes de la variable X. Si les résidus entre les deux modèles sont significativement différents, nous pouvons donc rejeter l'hypothèse de non causalité de Y vers X et accepter l'hypothèse de causalité de Y vers X. Ce test consiste donc en pratique à réaliser un test de Wald. Soit plus formellement tester l'hypothèse nulle $\gamma_i = 0$ pour $i = 1 \dots k$:

$$X_t = \sum_{i=1}^{i=k} \beta_i X_{t-i} + \sum_{i=1}^{i=k} \gamma_i Y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (5-6)$$

Le test de Sims (1972) utilise l'irréversibilité du temps pour examiner la causalité. En effet, la causalité ne remonte pas le temps. On peut donc vérifier si en plus du passé des deux séries, les valeurs futures d'une série X parviennent à prédire les valeurs présentes d'une variable Y. Si la réponse est positive nous pouvons en déduire que Y cause X. Soit plus formellement tester $\omega_i = 0$ pour $i = 1 \dots p$:

$$X_t = \sum_{i=1}^{i=k} \beta_i X_{t-i} + \sum_{i=0}^{i=k} \gamma_i Y_{t-i} + \sum_{i=1}^{i=p} \omega_i Y_{t+i} + \varepsilon_t \quad (5-7)$$

Toutefois certains chercheurs (Stern, 2011) estiment que le test de causalité de Granger ne peut pas être mené sur des variables non stationnaires. D'un autre coté, la réalisation d'un test de causalité à la Granger sur des variables en différence dans le cas de deux variables cointégrées écarte une partie de la relation (long terme notamment) donc de la causalité. La procédure de Toda and Yamamoto (1996) permet de résoudre cet obstacle car elle teste la causalité entre deux variables sans nécessiter que les variables soient cointégrées ou stationnaires. Cette procédure s'appuie sur un test de Granger augmenté, c'est-à-dire que nous introduisons dans le VAR un nombre de retards supplémentaires en tant que variables

exogènes égal au degré maximal d'intégration des deux séries (d). Soit plus formellement le modèle contraint :

$$X_t = \sum_{i=1}^{i=n+d} \beta_i X_{t-i} + \sum_{i=1}^{i=d} \gamma_i Y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (5-8)$$

Et le modèle non contraint :

$$X_t = \sum_{i=1}^{i=n+d} \beta_i X_{t-i} + \sum_{i=1}^{i=k+d} \gamma_i Y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (5-9)$$

4.4 Evolution comportementale des marchés du cobalt et du molybdène suite à l'introduction d'un marché à terme

Le molybdène a des chances d'entretenir des relations de cointégration avec des métaux partageant des débouchés assez proches. Le nickel remplit ce critère puisque les aciers ferreux, alliages et superalliages représentent 87% des secteurs d'usage finaux du nickel contre 76% pour le molybdène (USGS, 2013). La Figure 5-6 illustre l'évolution relativement similaire des prix du nickel et du molybdène.

Les tests de stationnarités de Phillips Perron (1988) effectués sur les logs des prix (l'origine et les données sont décrites dans la partie méthodologie) indiquent des séries intégrées d'ordre 1. Les résultats sont reportés en annexes¹¹⁸ et permettent de conclure que les séries sont intégrées d'ordre 1, I(1). Les tests de racine unitaire avec possibilité de rupture tels que décrits dans Perron (1997) ne rejettent pas non plus l'hypothèse d'une racine unitaire pour l'ensemble des séries de prix, hormis pour les prix *futures* du cobalt (Tableau 5-10).

Néanmoins, il apparaît que la relation établie entre le nickel et le molybdène est instable, notamment au début de la période. Cette instabilité en 2008 n'est pas surprenante et correspond à l'éclatement de la bulle des matières premières. Pour estimer cette rupture nous utilisons le test de Gregory-Hansen (1996). Or, le test de Gregory et Hansen identifie une rupture significative dans la relation de cointégration en date du 27 mars 2009 (Tableau 5-11). Nous procéderons donc à l'estimation de la relation de cointégration à partir de cette date.

¹¹⁸ Annexes 5.2.

Nous devons vérifier que le prix reporté du molybdène est cointégré sur le long terme avec le prix comptant LME du nickel. Le test de cointégration de Johansen confirme cette hypothèse. L'ordre du retard est choisi de sorte à minimiser le critère d'information d'Akaike. Les tests de cointégration de Johansen que ce soit le test de la trace ou de la valeur propre maximale rejettent l'hypothèse d'absence de vecteur de cointégration entre les deux variables au seuil de risque de 5% (Tableau 5-12). Nous introduisons également dans nos VECM, des variables dichotomiques (de zéro à quatre points¹¹⁹) afin de prendre en compte l'impact de certains événements particuliers signalés par *Metal Pages* comme les veillées de Noël, les augmentations subites et inhabituelles des prix reportés, les ruptures d'approvisionnement, etc. Nous vérifions aussi l'absence d'autocorrélation et d'hétéroscédasticité via plusieurs tests (test portemanteau et test de White) et l'ensemble des résultats issus de ces derniers, nous permettent d'accepter l'hypothèse d'absence d'autocorrélation et d'hétéroscédasticité au seuil de risque de 5%.

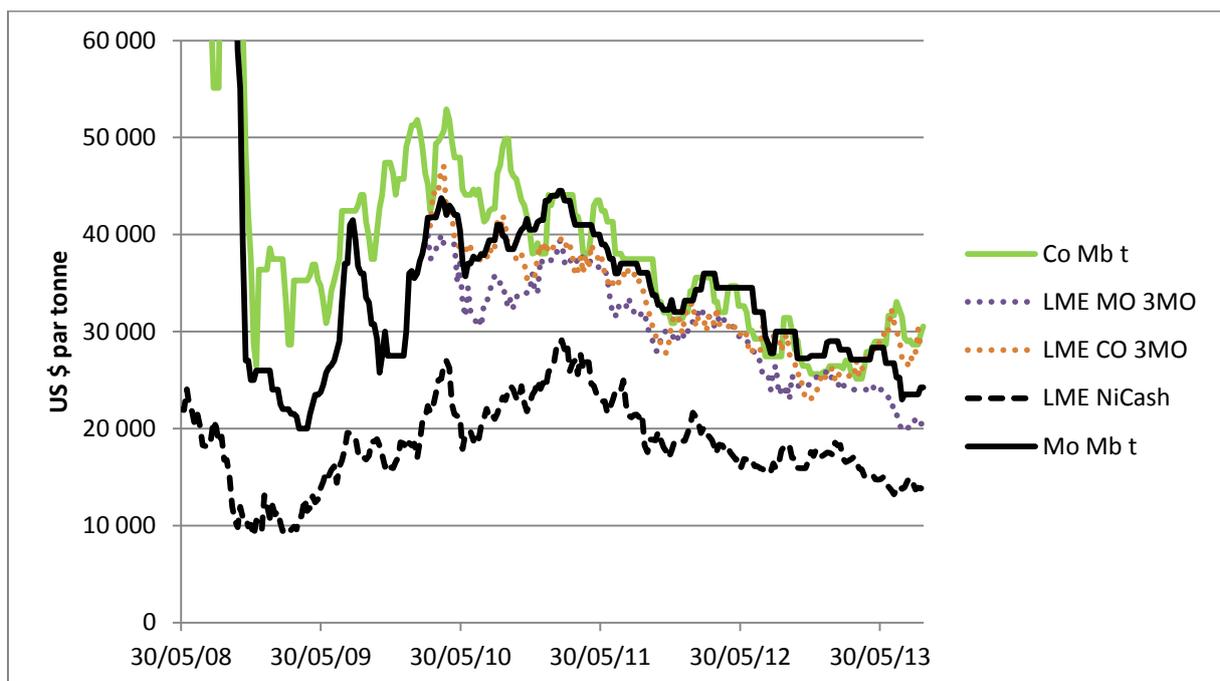


Figure 5-6 Séries de prix du molybdène et du nickel. Source : données LME et *Metal Bulletin*, calculs de l'auteur

¹¹⁹ Ces points pris en compte par des variables dichotomiques représentent moins de 3% des données.

Variabes	Date du break	Modèle IO1	Date du break	Modèle IO2	Date du break	Modèle AO
Lognispot	15/05/2009	-4,17	29/01/2010	-5,13	17/12/2010	-3,97
Logmomb	26/09/2008	-4,73	26/09/2008	-4,72	26/09/2008	-3,92
Logmospot	10/12/2010	-3,99	10/12/2010	-4,44	18/02/2011	-3,85
Logmofu	10/12/2010	-4,21	10/12/2010	-3,96	18/03/2011	-3,39
Logcomb	17/10/2008	-4,8	05/09/2008	-4,69	11/02/2011	-3,83
Logcospot	05/04/2013	-4,38	21/09/2012	-5,12	01/02/2013	-4,03
Logcofu	05/04/2013	-5,05*	21/09/2012	-5,91**	08/02/2013	-4,82**

Tableau 5-10 Résultat du test de racine unitaire avec rupture de Perron. Modèle IO1 :- -4,82*, -5,1**, -5,7*** Modèle IO2 : -5,25*, -5,55**, -6,21*** Modèle AO : -4,38*, -4,65**, -5,28***. Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : calculs de l'auteur

Relation	Date de rupture	Modèle 1	Date de rupture	Modèle 2
Nickel-Molybdène	27/03/2009	-5,259***	27/03/2009	-5,259**

Tableau 5-11 Résultat du test de Gregory Hansen. Modèle 1 :- -4,61**, -5,13*** Modèle 2 :-4,95**, -5,47***. Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : calculs de l'auteur

Test de cointégration			
	Eigenvalue	Trace Statistic	Prob.
Test de la trace			
None	0.077885	20.23557***	0.0089
At most 1	0.012949	2.802200*	0.0941
Test de la valeur propre maximale			
	Eigenvalue	Max-Eigen Statistic	Prob.
None	0.077885	17.43337**	0.0153
At most 1	0.012949	2.802200*	0.0941

Tableau 5-12 Test de cointégration de Johansen entre le prix reporté du molybdène et le prix comptant du nickel avec deux retards. Source : calculs de l'auteur

Nous pouvons ensuite estimer un VECM dont les résultats sont fournis dans le Tableau 5-13. L'élasticité de long terme est positive et non significativement différente de l'unité, ce qui signifie que le prix reporté du molybdène subit des évolutions similaires aux variations du prix spot LME du nickel sur le long terme. Les coefficients attachés aux corrections d'erreurs sont négatifs et significativement différents de zéro pour le prix reporté du molybdène et pour le prix LME du nickel. La correction de l'équilibre est faible (5%) ce qui semble conforter l'idée que le prix du molybdène met un temps important pour revenir à l'équilibre.

Cointegrating Eq :		CointEq1	
LOGMOMB(-1)		1.000000	
LOGNISPOT(-1)		- 1.056587***	
		(0.10675)	
C		- 0.014834	
Error Correction:	D(LOGMOMB)	D(LOGNISPOT)	
CointEq1		- 0.050047**	0.112030***
		(0.02127)	(0.03434)
D(LOGMOMB(-1))		0.163923***	0.133924
		(0.06434)	(0.09626)
D(LOGMOMB(-2))		-0.012369	0.036766
		(0.05947)	(0.09599)
D(LOGNISPOT(-1))		0.071771	0.043927
		(0.04577)	(0.07387)
D(LOGNISPOT(-2))		0.088889	0.089225
		(0.04413)	(0.07123)
C		-0.001761	0.001523
		(0.00192)	(0.00309)
Dummie1		0.129370***	0.033888
		(0.02887)	(0.04659)
Dummie2		-0.096032***	-0.029426
		(0.02833)	(0.04572)
Dummie3		0.072149**	-0.031965
		(0.02816)	(0.04546)
R-squared		0.248164	0.085161
F-statistic		8.499487	2.397028
Portemanteau tests	Q-stat	P-value	
Lag 3		3.268959	0.7744
Lag 4		8.558884	0.5744
White test	Joint test	P-value	
Chi-square		45.01729	0.2346

Tableau 5-13 Estimation du modèle VECM entre le molybdène et le nickel, 27/03/2009-20/09/2013, Ecart-type : ().
Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : calculs de l'auteur

Autrement dit, 5% du déséquilibre de court terme consécutif à un choc de prix sur le molybdène est corrigé par semaine. La demi-vie¹²⁰ d'un choc est longue et il faut près de 3 mois pour que 50% d'un choc soit absorbée. Ceci peut s'expliquer probablement à la fois par la nature faiblement liquide du marché du molybdène (empêchant de corriger rapidement les

¹²⁰ La demi-vie d'un choc s'obtient par la formule suivante : $\ln(0,5)/\ln(1-\theta)$ où θ représente la valeur du coefficient de retour à l'équilibre.

déséquilibres) et par les estimations imprécises du prix du molybdène à court terme par les agences d'évaluation des prix.

Toutefois, il convient de s'assurer du sens de la causalité de cette relation. L'ensemble des résultats basés sur ces tests est résumé dans le Tableau 5-14.

Le test de Toda and Yamamoto a été réalisé avec deux retards (le nombre de retards a été déterminé par le critère AIC). Le test de Toda and Yamamoto nous permet de rejeter l'hypothèse de non causalité au seuil de risque de 1% du nickel vers le molybdène et au seuil de risque de 5% du molybdène vers le nickel. Le test de Sims en différence première pencherait davantage vers une relation bi-causale avec une causalité plus évidente du molybdène vers le nickel. La même procédure est réitérée pour tester la causalité au sens de Granger sur les séries de prix en différence première. Ce test valide, là encore, l'existence d'une causalité bi-directionnelle à 5% mais avec une causalité plus évidente du nickel vers le molybdène.

Relation	Cointégration	Causalité Granger Δp_x	Causalité Sims Δp_x	Causalité Toda & Yamamoto	Part de la variance
Logpxmo => logpxni	Non rejetée au seuil de 5%	Non rejetée au seuil de 5% (k=2)	Non rejetée au seuil de 1% (k=2, p=1)	Non rejetée au seuil de 5% (k=3)	1,96% (k=3)
Logpxni => logpxmo	Non rejetée au seuil de 5%	Non rejetée au seuil de 1% (k=2)	Non rejetée au seuil de 5% (k=2, p=1)	Non rejetée au seuil de 1% (k=3)	2,88% (k=3)

Tableau 5-14 Récapitulatif des tests de causalité. Source : calculs de l'auteur

Nous sommes maintenant amenés à vérifier si cette relation a pu être modifiée suite à l'introduction du marché à terme du molybdène.

Dans cette seconde sous partie, nous analyserons la modification du comportement du marché du molybdène suite à la création de son marché organisé. Dans cette optique, l'échantillon a été divisé en deux périodes. La première période d'analyse s'étend du 27/03/2009 au 26/02/2010, date de la création du marché organisé du molybdène. La seconde période débute à cette date et se termine le 20/09/2013.

Dans la première période, le nickel et le molybdène apparaissent comme très faiblement liés. L'estimation des réponses impulsionnelles suite à des modifications des prix du spot nickel et du molybdène reporté indique une absence de réponses croisées (Figure 5-7). Ces résultats sont confirmés par les tests de causalité de Granger en différence première acceptant

l'hypothèse de non causalité bi-directionnelle et par ceux de Toda et Yamamoto (causalité uniquement du nickel vers le molybdène au seuil de risque de 10%).

Sur la seconde période, nous nous intéressons à la relation entre le prix comptant LME du molybdène et le prix comptant LME du nickel. Le test de cointégration de Johansen valide l'hypothèse de cointégration entre les deux séries. L'estimation du VECM laisse apparaître une évolution indépendante du prix du nickel par rapport au molybdène et à l'équilibre de long terme¹²¹ ainsi qu'une force de rappel plus forte du prix du molybdène vers le prix du nickel par rapport à la période entière estimée précédemment (12% au lieu de 5%). En d'autres termes, un choc est absorbé en moins de temps sur cette seconde période¹²², et le prix du molybdène converge beaucoup plus rapidement vers l'équilibre de long terme. Le VECM montre également que le prix spot du molybdène suit le prix spot du nickel sur la seconde période puisque ce dernier ne converge pas vers l'équilibre de long terme. Ce constat est conforté par les réponses d'impulsion (Figure 5-8) indiquant une réaction retardée du prix spot du molybdène par rapport à une modification du prix spot du nickel. Ces réponses d'impulsion montrent que le prix du nickel et du molybdène réagissent positivement un choc de prix survenu en t_0 durant la première période puis que cet effet s'estompe ensuite. Plus intéressant, les réponses croisées dévoilent une réaction retardée du prix du molybdène par rapport au nickel en deuxième période. De la même manière, les tests de causalité affermissent l'hypothèse d'un renforcement de la causalité du nickel vers le molybdène suite à la création du marché à terme. Cette accentuation évidente de la réactivité du marché du molybdène aux fluctuations des fondamentaux du nickel, peut s'expliquer d'une part par un gain d'efficacité du marché du molybdène via l'introduction de son marché à terme, avec des agents économiques ayant identifiés des fondamentaux similaires entre nickel et molybdène et réalisant des arbitrages conduisant à mieux refléter cette similarité. D'autre part, Weaver et Banerjee (1990) estiment que le principe de diversification du risque dans la gestion de portefeuilles d'investisseurs conduit à créer des corrélations dans les mouvements de prix entre différentes commodités, y compris celles ne partageant aucun fondamentaux communs.

¹²¹ En d'autres mots, le nickel ne subit pas de force de rappel vers l'équilibre de long terme contrairement au molybdène.

¹²² La demi-vie d'un choc est réduite à six semaines au lieu de trois mois lorsque l'échantillon est restreint à la seconde période.

Cointegrating Eq:	CointEq1	
LOGMOSPOT(-1)	1.000000	
LOGNISPOT(-1)	-0.992266***	
	(0.09545)	
C	-0.495604	
Error Correction:	D(LOGMOSPOT)	D(LOGNISPOT)
CointEq1	-0.121559***	0.042124
	(0.02894)	(0.04014)
D(LOGMOSPOT(-1))	-0.241770***	-0.218144**
	(0.07021)	(0.09740)
D(LOGNISPOT(-1))	0.087932	-0.042081
	(0.05939)	(0.08238)
C	-0.004203*	-0.002921
	(0.00227)	(0.00315)
R-squared	0.198522	0.042680
F-statistic	13.21040	2.377741
Portemanteau tests	Q-stat	P-value
Lag 2	3.268959	0.7661
Lag 3	11.56545	0.3152
White test	Joint test	P-value
Chi-square	23.68523	0.1656

Tableau 5-15 Estimation du modèle VECM entre le molybdène et le nickel sur la seconde période, Ecart-type : ().
Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : calculs de l'auteur

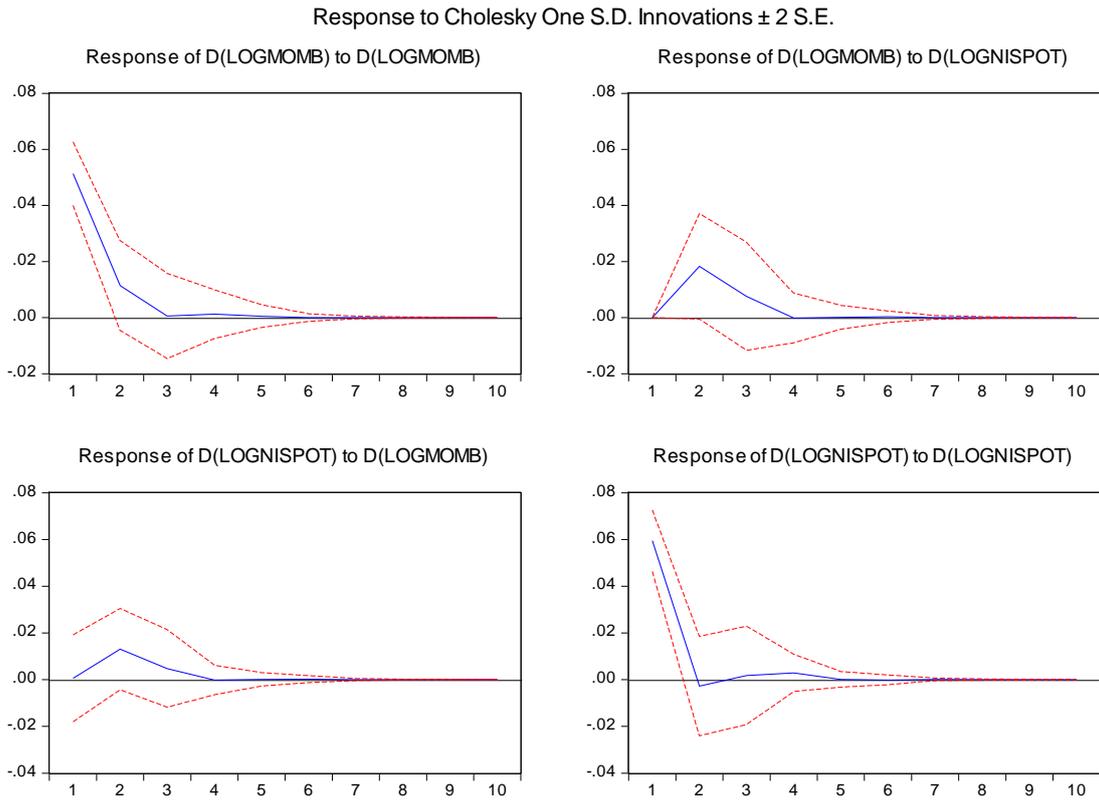


Figure 5-7 Réponse d'impulsion sur la première période, Seuil de risque à 5% : ligne rouge. $k=2$. Source : calculs de l'auteur

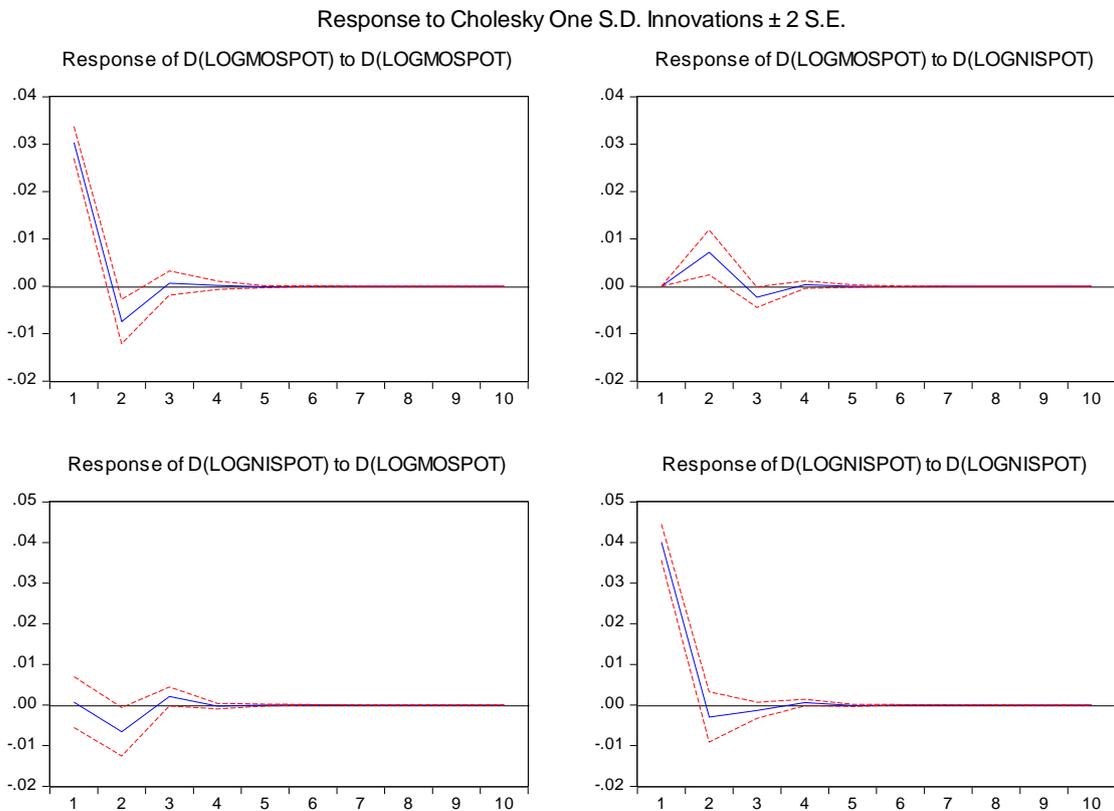


Figure 5-8 Réponse d'impulsion sur la seconde période, Seuil de risque à 5% : ligne rouge. $k=1$. Source : calculs de l'auteur

Relation	Période	Granger différence première	Toda and Yamamoto
lognispot => logmomb	1	Rejetée (k=2)	Non rejetée à 10% (k=2)
logmomb => lognispot	1	Rejetée (k=2)	Rejetée (k=2)
lognispot => logmospot	2	Non rejetée à 1% (k=1)	Non rejetée à 1% (k=3)
logmospot => lognispot	2	Non rejetée à 5% (k=1)	Rejetée (k=3)

Tableau 5-16 Relation de causalité entre le nickel et le molybdène selon la période. Source : calculs de l'auteur

Nous avons vu précédemment que le comportement du prix du molybdène s'est modifié suite à l'introduction d'un marché à terme en renforçant sa relation de cointégration avec le nickel. Toutefois, plusieurs questionnements subsistent. Tout d'abord, dans un régime de marché où existent deux systèmes de cotation du prix, un basé sur une cotation de marché organisé et un autre fondé sur un système de prix reporté à partir de transaction de gré à gré, il est légitime de s'assurer lequel des deux assurent le mécanisme de découverte du prix. Enfin, on peut sans doute se demander si le fonctionnement des marchés à terme sur de si petits marchés réussit à remplir les fonctions pour lesquelles il a été créé.

Pour répondre à la première question, nous avons repris la méthodologie établie dans les parties précédentes en utilisant les données pour le molybdène et le cobalt (Annexe 5-71 et Annexe 5-72). Par souci de lisibilité, les tests de cointégration et les estimations des VECM sont reportées en annexes. Les données confirment une relation de cointégration entre les prix reportés et les prix comptant du LME pour le molybdène et le cobalt. Dans les deux cas, les estimations des modèles VECM confirment des prix comptant LME ne subissant pas la force de rappel vers l'équilibre de long terme contrairement aux prix reportés, ce qui impliquerait des prix comptants cotés directeurs par rapport aux prix reportés. Cette hypothèse est également étayée par les tests de causalité et les réponses d'impulsions. Les données empiriques semblent donc soutenir l'idée d'une prédominance du marché organisé sur les relations de gré à gré dans le mode de formation des prix sur ces deux marchés étroits.

Relation	Granger différence première	Toda and Yamamoto
logmospot => logmomb	Non rejetée à 1% (k=1)	Non rejetée à 1% (k=2)
logmomb => logmospot	Rejetée (k=1)	Rejetée (k=2)
logcospot => logcomb	Non rejetée à 1% (k=5)	Non rejetée à 1% (k=3)
logcomb => logcospot	Non rejetée à 1% (k=5)	Non rejetée à 5% (k=3)

Tableau 5-17 Relation de causalité entre les prix reportés et les prix spot du LME. Source : calculs de l'auteur

Au contraire, l'application de cette procédure dans l'optique d'étudier les relations entre prix comptants et *futures* du molybdène et du cobalt révèle l'inefficience de ces marchés caractérisée par une absence de mécanisme de découverte du prix par les marchés *futures* et

par une absence régulière de base¹²³ entre le prix *futures* et le prix spot du LME. Les différents tests de causalité acceptent également l'hypothèse de non causalité entre le prix comptant et *futures* de ces métaux.

Relation	Granger différence première	Toda and Yamamoto
logmospot => logmofu	Rejetée (k=1)	Rejetée (k=3)
logmofu => logmospot	Rejetée (k=1)	Rejetée (k=3)
logcospot => logcofu ¹²⁴	Rejetée (k=1)	Rejetée (k=1)
logcofu => logcospot	Rejetée (k=1)	Rejetée (k=1)

Tableau 5-18 Relation de causalité entre les prix reportés et les prix spot du LME. Source : calculs de l'auteur

5 Conclusion

Les métaux mineurs restent encore très majoritairement des micromarchés où transitent peu d'informations. Nous avons vu dans une première partie de ce chapitre que l'apparition de marché à terme pour la plupart de ces métaux rares demeure très improbable compte tenu de la taille de ces marchés. Or, l'opacité sur les prix, les stocks et les échanges accentue l'incertitude à laquelle font face les producteurs et favorise l'émergence de sociétés privées d'agence d'évaluation des prix (Blomberg, Reuters, Platts, Metal bulletin, Metal prices...). Les stratégies d'intégration verticale, de mise en place de contrats de long terme, ou d'investissement dans la filière minière pour acquérir de l'information, développées par les producteurs et les consommateurs de ces métaux ne les écartent pas de l'influence de ces agences de prix dont le système de cotation et de pondération des prix est parfois très opaque. En effet, il arrive tôt ou tard que les contrats de long terme ou les investissements soient réévalués en fonction des prix reportés par ces agences. Certains consommateurs industriels ont par exemple, pour pallier le risque de rupture d'approvisionnement, investi dans des projets miniers détenus par des juniors en échange d'une livraison de la production réservée à un prix fixé par le prix comptant reporté du moment (CGSP, 2013). Il se pose donc aussi bien la question de la transparence du processus établi par ces agences que celle de la validité du reporting sur des marchés aussi peu liquides.

Par conséquent, la création de marché à terme pour certains des métaux mineurs les plus en devenir ne peut qu'accentuer la transparence en facilitant l'accès à l'information publique. A ce titre, la déclaration récente de l'entreprise minière Freeport concernant sa volonté de

¹²³ La base représente la différence entre le prix *futures* et le prix comptant d'une commodité.

¹²⁴ Ces résultats doivent être interprétés avec prudence car les tests de racine unitaire avec rupture de Perron suggèrent que la série logcofu est stationnaire autour d'une rupture.

basculer des prix du cobalt reporté par Metal Bulletin vers les prix officiels du LME illustre parfaitement la préférence des agents économiques pour la transparence des marchés financiers.

Néanmoins, le molybdène et le cobalt, deux des plus importants métaux mineurs, ne semblent pas attirer assez d'acteurs et développer suffisamment d'intérêt pour que leur marché à terme assurent correctement le rôle de mécanisme de découverte du prix. Ce dysfonctionnement se caractérise par une absence de cointégration détectée entre les prix *futures* à trois mois et les prix comptants des deux métaux. L'absence de base constante durant de longues périodes entre les prix *futures* et les prix spots apparaît aussi comme une autre manifestation de l'illiquidité de ces marchés. Cette immaturité des marchés soulève plusieurs questions : nous pouvons nous interroger sur l'intérêt manifesté par le LME pour introduire des marchés à terme sur ces métaux mineurs mais aussi nous enquêter de la nécessité d'un tel marché pour les agents opérant sur ces marchés. Une partie de la réponse à la première question provient probablement de la compétition acharnée existante entre le LME, le Chicago Mercantile Exchange¹²⁵ (COMEX) et le Shanghai Futures Exchange (SHFE). Les récents déboires du LME pour échanger l'aluminium ont d'ailleurs donné lieu à l'annonce de l'introduction d'un contrat à terme concurrent par le COMEX. Dans ce contexte, il n'est pas surprenant que le LME s'empresse d'introduire des métaux mineurs n'ayant pas encore tout à fait la taille critique nécessaire à une introduction en bourse. Ensuite, l'aluminium a montré par le passé qu'il a fallu près de sept ans pour que les producteurs adoptent les contrats à terme du LME et permettent le décollage de son marché financier. Néanmoins, ce manque de liquidité, s'il persiste dans le futur, ne peut que diminuer l'attrait de ces marchés à terme et faire fuir les acteurs. Ce qui nous pousse à prédire un échec et la disparition de ces marchés à terme, si aucune rupture ne survient dans l'activité des marchés spot, à l'instar de ce que mettent en avant Brorsen et Fofana (2001) dans leur revue des causes liées aux succès et à l'échec des marchés à terme.

En ce qui concerne la question de l'épuisement, les modèles théoriques ne sont pas parvenus pour l'instant à déterminer l'impact de l'absence de marché à terme. Néanmoins, il semble se dégager un consensus sur l'inefficacité de la situation sans qu'il n'y ait de preuves formelles d'un sur-épuisement ou d'un sous-épuisement de la ressource.

¹²⁵ Maintenant New York Mercantile Exchange (NYMEX).

Au final, la transition énergétique telle qu'elle est envisagée aujourd'hui contraint les producteurs et les consommateurs à recourir de plus en plus aux métaux rares. L'usage de ces métaux implique plus d'incertitude et une plus faible visibilité sur l'avenir du fait de l'absence de marché organisé. Cette nouvelle économie expose aussi les agents économiques à davantage de volatilité des prix sans qu'il ne soit pour autant économiquement supportable de créer des marchés à terme pour réduire celle-ci.

Toutefois, les contraintes envisagées dans les chapitres précédents restent des menaces de second ordre en comparaison du potentiel de nuisance de la contrainte d'épuisement des métaux pour l'ensemble de l'économie. Cette contrainte est d'autant plus périlleuse qu'elle partage un effet joint avec la dégradation qualitative de l'énergie actuellement en cours. La prise en compte de ce mécanisme de rétroaction positive nécessite néanmoins une vision nouvelle de l'épuisement mais également des interactions entre le secteur des métaux et le secteur énergétique. Le prochain chapitre vise à fournir des éléments d'analyse sur ces questions et s'attache à soulever les problématiques liées aux métaux introduits par la transition énergétique.

CHAPITRE 6 : CONTRAINTE D'ÉPUISEMENT DE LA RESSOURCE

« As a Nation we have always been more interested in sawmills than seedlings. We have put much more engineering though into the layout of factories to cut up metals than into mining processes to produce them. We think about materials resources last, not first. »
Resources for Freedom, Volume I, Foundation for earth and security, 1952 p.1.

« There is a limit to which substitution is possible (...) There is a limited number of elements available and at the moment almost all of them have useful applications. Shifting from one to the other will therefore in many cases simply shift the problems of material availability from one sector to another. »

Kleijn et al, *Metal requirements of low-carbon power generation*, Energy, 2011

« Le temps du monde fini commence ».

Paul Valery, *Regards sur le monde actuel*, 1945.

1 Introduction

De plus en plus d'études sur l'épuisement des matières premières ont été publiées au cours de la dernière décennie (UKERC, 2013a). L'objet de ce chapitre est de réinterroger la notion d'épuisement et d'évaluer l'impact de l'épuisement des métaux sur la mise en œuvre de la transition énergétique. Nous développons à cet effet deux analyses.

La première partie est consacrée à l'analyse des résultats et des limites des études récentes relatant les études de criticité. En effet, ce concept vise à apprécier les différentes facettes du risque associé à un métal en vue d'estimer le risque d'approvisionnement relatif à une industrie ou un pays (cf. chapitre 1). Les périmètres des études restent cependant circonscrits dans le temps, dans l'espace et sur le plan sectoriel. La transition énergétique amène à reconsidérer ces périmètres et peut remettre en cause les résultats de ces études. Ces points seront développés dans un premier temps. Par ailleurs, nous interrogerons la notion d'épuisement quantitatif comme l'un des principaux critères évoqués par les études de criticité pour cerner l'épuisement d'une ressource. Il semblerait que cette notion soit trop limitée pour appréhender correctement le concept d'épuisement économique. Or, ce concept d'épuisement économique reste central pour définir la soutenabilité d'une société. Nous ne pouvons pas réduire la question de l'épuisement économique des ressources naturelles à un problème de quantités de métaux ni même à la notion de réserves (ce qui est souvent fait

aujourd'hui quand cette question est considérée). La soutenabilité d'une société implique de généraliser ces études de criticité à un horizon de très long terme en prenant en compte non seulement l'aspect quantitatif des métaux mais aussi qualitatif. Nous verrons en quoi l'intégration de cet angle d'approche de l'épuisement peut amener à réviser les positions tenues sur l'épuisement quantitatif des métaux.

Ceci nous amène dans une seconde partie, où nous préciserons comment la transition énergétique pourrait renforcer les connexions entre énergies et métaux. Nous développerons à cet effet, une analyse s'appuyant sur l'indicateur du EROI (cf. chapitre 3) pour mettre en avant la dégradation qualitative de l'énergie et des métaux afin d'étudier dans un second temps comment ces deux phénomènes se renforcent mutuellement.

Finalement, nous évaluerons dans une troisième partie l'impact de l'épuisement des métaux sur le secteur des énergies renouvelables dans une perspective de très long terme.

2 Des études de criticité perfectibles

2.1 Les études réalisées sur le sujet

Les études de criticité publiées au cours des années 2000 sont très nombreuses puisqu'on ne recense pas moins de 70 études contre moins de trente études au cours des cinq dernières décennies du vingtième siècle. L'objet de cette partie n'est pas de les présenter en détail, mais de montrer comment elles peuvent appuyer la thèse d'une épuisabilité des métaux employés dans l'économie et plus précisément dans le secteur de l'énergie. Pour cela il importe de questionner leur méthodologie, leurs résultats et leur périmètre d'analyse. Nous dégageons alors certaines limites et proposons des analyses complémentaires afin de compléter ces résultats.

Certaines méthodologies consistent à créer un ensemble d'indicateurs reflétant chacun un aspect particulier influant sur la criticité d'un métal : niveau de concentration géographique et sectorielle de l'offre, possibilités de substitution, importance dans la chaîne de valeur de l'industrie ou du pays... A ce titre, une étude rétrospective de l'UKERC (2013c) a montré que les méthodologies diffèrent selon l'unité de mesure, le choix et le système de pondération des indicateurs, le périmètre d'analyse (géographique et sectoriel), l'horizon temporel, ainsi que le nombre de métaux étudiés (monographie ou global). Les indicateurs de criticité apparaissent en général comme de quatre natures possibles :

- Liés à des facteurs de l'offre (disponibilité géologique et économique, recyclage...)

- Liés à des facteurs de la demande (projection de la demande future, substituts possibles)
- Liés à des facteurs géopolitiques (politique et régulation, risque géopolitique, concentration de l'offre).
- Liés à d'autres facteurs (réduction des coûts par la technologie, problématiques environnementales, importance économique, couverture informationnelle).

On remarquera d'ailleurs que certaines études de criticité ont préféré ne pas adopter de système de pondération, pour éviter que des opinions subjectives ne transparaissent dans la criticité finale (Rosenau-Tornow et al., 2009). D'autres auteurs (Gleich et al., 2013) estiment au contraire qu'un système de pondération unique par métal est nécessaire dans la mesure où le prix de chaque métal n'est pas impacté de la même manière par les différents indicateurs. Cette même étude conteste les choix souvent arbitraires de pondération utilisés dans les études internationales et propose un système de pondération fondé sur l'importance de chaque indicateur de criticité dans la détermination du prix de marché de la ressource. Par exemple, ils montrent que le prix de marché du molybdène est surtout impacté par les critères de niveau des stocks, de niveau de production minière, et de niveau de consommation alors que le prix de l'argent est davantage affecté par la concentration géographique de la production, et par le niveau de la production minière.

Souvent, la soutenabilité de long terme, qui permet d'estimer la pérennité d'un système sous réserve d'une prolongation des conditions actuelles, n'est qu'un indicateur parmi d'autres (Graedel et al., 2012 ; Nassar et al., 2012). D'autre fois, elle n'apparaît dans aucun des critères retenus (European Commission, 2010 ; DOE, 2011). Pourtant, ce concept fut reconnu comme central dans la plupart des rapports s'interrogeant sur la place des matières premières dans le soutien de nos systèmes économiques (Stiglitz et al., 2009). C'est pourquoi, il serait intéressant d'associer à ce concept des critères même imparfaits.

Concernant les résultats des études, il reste difficile de dégager des tendances générales compte tenu des différences subsistant dans les méthodologies retenues. Néanmoins, l'étude de l'UKERC (2013c) a effectué une normalisation des résultats obtenus par un ensemble d'études de criticité. Cette normalisation fait ressortir une variabilité importante des degrés de criticité des métaux rares selon les études envisagées (Figure 6-1). Par exemple, pour le lithium, ce niveau de criticité peut aller d'un peu moins de trois à un peu moins de six sur une

échelle normalisée à dix. Pour le gallium, la variabilité est encore plus forte avec un minimum de quatre et un maximum de dix.

Toutefois, l'avantage de ces études repose sur l'éclairage quantitatif apporté aux nouvelles technologies de l'énergie. En effet, elles ont tendance à révéler une intensité matérielle des nouvelles technologies nettement supérieure aux technologies traditionnelles de l'énergie que ce soit pour les métaux rares (UKERC, 2013ab ; SEI, 2012, Phihl et al., 2012 ; Yang, 2009 ; Kleijn et Van der Voet, 2010 ; Elshkaki et Graedel, 2013 ; Moss et al., 2013), les métaux de base ou les ressources minérales (Phihl et al., 2012, Vidal et al, 2013 ; Lund, 2007 ; Kleijn et al., 2011 ; Elshkaki et Graedel, 2013 ; Ashby, 2013). Par exemple, d'après Ashby (2013), la quantité de matières premières par MW de puissance électrique installée est beaucoup plus faible pour les énergies traditionnelles (605-1080 kg pour le gaz, 170-625 kg pour le nucléaire) que pour les nouvelles technologies de l'énergie (1500-3000 kg pour le solaire photovoltaïque à couches minces, 500-2000 kg pour l'éolien terrestre)¹²⁶. Cette tendance a des conséquences importantes, puisque cela implique que notre mix énergétique consomme davantage de métaux par MW de puissance installée et qu'un basculement graduel vers des technologies vertes réclamera de plus en plus de métaux (à puissance constante). Ces résultats s'inscrivent par ailleurs dans des contextes d'études souvent limités ce qui peut conduire à les reconsidérer. En effet, les études restent focalisées sur les nouvelles technologies de l'énergie essentiellement renouvelables (Eolien, solaire, énergie marine...). Or, compte tenu du potentiel d'émission des gaz à effet de serre des énergies carbonées, les technologies liées à ces énergies sont amenées à basculer vers des technologies à meilleur rendement énergétique et à plus faible empreinte carbone (capture et séquestration du carbone, centrales critiques et supercritiques). Si nous savons que ces nouvelles technologies consomment des métaux rares, aucune étude ne permet aujourd'hui d'évaluer les quantités de métaux rares et de métaux de base en jeu. Le même constat peut être dressé pour le nucléaire de troisième et quatrième génération. Par ailleurs, il ressort que les quantités nécessaires de métaux recensées par les études d'évaluation sont souvent limitées au périmètre strict de construction du système énergétique. Cela signifie que la consommation indirecte de métaux impliquée dans la production, le transport, l'entretien et le démantèlement des matériaux nécessaires au système énergétique n'est pas incluse. Les études prennent aussi rarement en compte les besoins matériels des infrastructures entourant le système énergétique (infrastructure de stockage,

¹²⁶ Ces mesures sont données par kW nominal, c'est-à-dire non corrigé du facteur de charge des différents types d'énergie. Cette correction accroît encore les disparités entre les nouvelles technologies de l'énergie et les énergies traditionnelles.

transmission, distribution et usage de l'énergie). Or l'évaluation des besoins en métaux du système énergétique de demain requiert de connaître l'ensemble de ces variables au risque de sous-estimer la demande future.

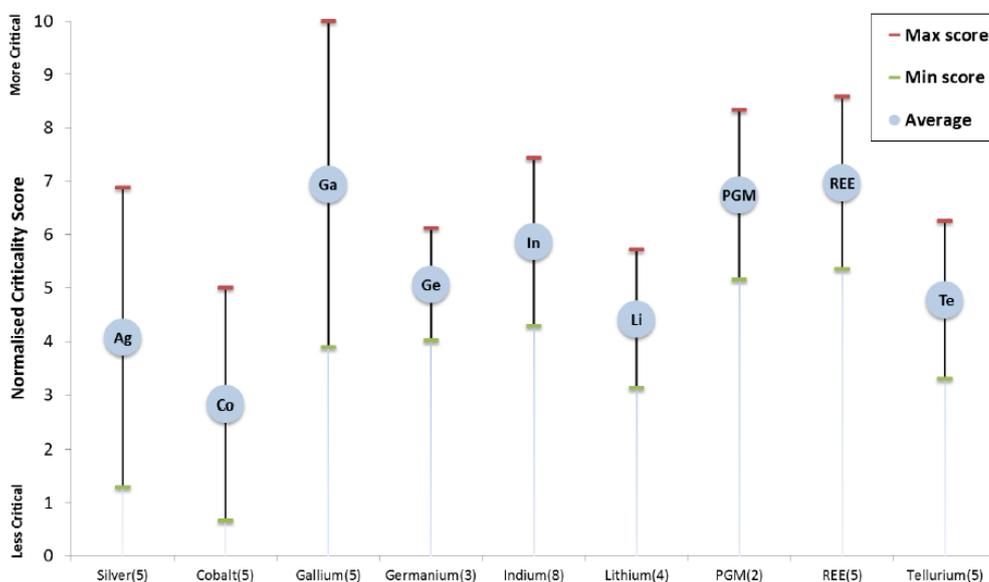


Figure 6-1 Score de criticité et étendue de l'incertitude après normalisation de la littérature, le nombre d'études est indiqué entre parenthèse. Source : UKERC (2013c, p.19)

Finalement, les études existantes souffrent, de manière générale, d'un manque de généralisation géographique, sectorielle et temporelle. Un métal qui peut apparaître comme non contraignant à une échelle réduite peut le devenir lorsque l'analyse est portée à une échelle plus globale. Par exemple, une étude comme celle réalisé par Moss et al. (2013) et qui a servi de fondation à l'action de la commission européenne (JRC, 2011), détermine la criticité des métaux pour les nouvelles technologies de l'énergie sur des critères restreints de ce point de vue : les besoins en métaux des secteurs de l'énergie, seulement, et au niveau européen, seulement. Or, les secteurs de l'énergie sont en concurrence avec d'autres secteurs (électronique, bâtiments...) dans l'usage des métaux tout comme l'est l'Europe avec les autres pays du monde. Dans ces conditions, comparer les résultats (forcément sous estimés) issus de cette analyse avec la production mondiale de métaux risque de sous estimer le risque de pénurie voire ne pas pouvoir tout simplement le révéler.

A contrario, les possibilités de substitution de chaque métal dans ces différents usages sont rarement évoquées et encore moins modélisés, elles constituent néanmoins une source de divergence très importante dans les scénarios.

2.2 *La substitution comme solution à court-moyen terme*

Une optique intéressante pour montrer l'ampleur des phénomènes de substitution au niveau de la demande d'un métal pour les nouvelles technologies de l'énergie (NTE) consiste à percevoir ce mécanisme comme le produit de plusieurs facteurs (Figure 6-2). Le premier facteur, la quantité d'énergie demandée influence la puissance installée pour répondre à cette demande et donc la quantité de métal incorporée dans ce système énergétique. Plusieurs variables centrales comme la population mondiale, la croissance économique, la structure de l'économie et l'intensité énergétique des activités concourent à ce que rouage tourne plus ou moins vite. Ensuite, pour une même demande énergétique, le contenu du mix énergétique influence lui aussi la quantité de métaux appelés puisque nous avons vu que les différentes énergies n'ont pas le même contenu en métaux (cf. Les études réalisées sur le sujet de ce chapitre). La composition du mix énergétique est donc une seconde source de substitution entre les métaux. Ce facteur peut être modifié suite à des changements affectant les politiques énergétiques, le coût relatif des différentes énergies, les dotations factorielles des pays en matières premières, le niveau de développement... Dans un troisième temps, le mix technologique, mesuré usuellement par la part de marché des différentes technologies d'une même énergie, agit également sur la quantité de métaux demandés. A titre d'illustration, les différentes technologies de panneaux photovoltaïques ne réclament ni les mêmes quantités de métaux ni les mêmes natures de métaux. Une troisième source de substitution technique est alors définie selon les mix technologiques employés. L'évolution de ce mix technologique d'une même énergie fluctue probablement principalement en fonction de la capacité de la technologie à remplir un certain nombre de contraintes tout en garantissant un coût compétitif vis-à-vis des technologies concurrentes existantes. Enfin, l'intensité matérielle d'une technologie peut évoluer à la baisse avec le temps sous l'effet du progrès technique ce qui contribuera, dans le long terme à reconsidérer les quantités de métaux pour chaque technologie de chaque énergie. Il en résulte une incertitude inhérente à chaque échelon qui rend l'exercice de projection de la demande de chaque métal difficile.

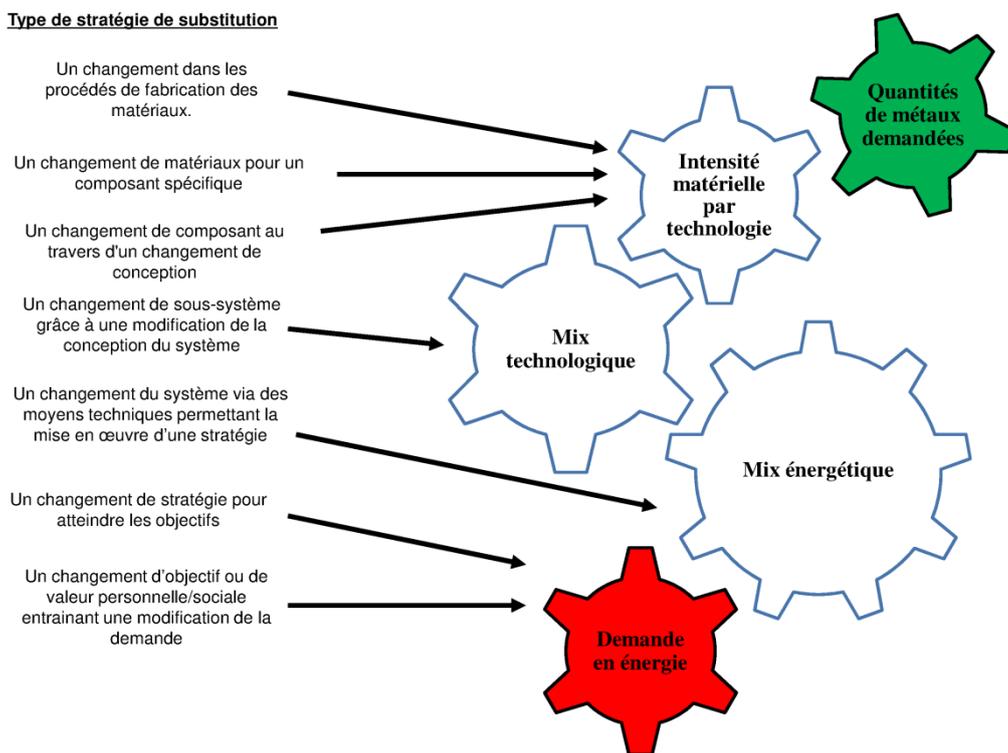


Figure 6-2 Facteurs déterminant les quantités de métaux appelées par les nouvelles technologies de l'énergie. Source : auteur

Cependant, l'un des corollaires majeurs découlant de cette proposition réside dans l'importance des possibilités de substitution d'un métal. Si jamais, un métal apparaissait comme particulièrement contraignant pour mettre en œuvre la transition énergétique, l'une des possibilités pourrait passer par des modifications au niveau des trois échelons centraux. Ce concept à trois échelons peut en réalité être approfondi et davantage détaillé comme l'a fait Altenpohl (1980) dans sa hiérarchie de la substitution (cf. Encadré 6.1) reprise par Rankin (2011). Plus nous descendons cette hiérarchie moins la mesure de substitution aura un impact important et moins elle sera difficile à mettre en œuvre. De la même manière, l'auteur a montré que la vitesse des changements s'accroît en descendant cette hiérarchie. A titre illustratif, nous avons repris et appliqué cette hiérarchie à la diminution des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur du transport :

- 1) Abandonner la société de mobilité
- 2) Favoriser le déplacement virtuel (télétravail, visioconférence...) plutôt que physique
- 3) Développer le transport en commun plutôt que le véhicule particulier

- 4) Encourager le moteur électrique plutôt que le moteur à combustion interne
- 5) Produire des batteries Lithium-ion plutôt que des batteries au plomb
- 6) Choisir des cathodes utilisant du manganèse ou du phosphate plutôt que du cobalt
- 7) Produire du lithium à partir de saumures plutôt qu'extrait des spodumènes

Ainsi, la substitution apparaît comme un ajustement de court terme lorsqu'il s'agit de pallier l'épuisement d'un métal car la pression est alors reportée sur un autre métal, ce qui ne manquera pas d'accélérer sa vitesse d'épuisement.

Encadré 6-1 : La hiérarchie de substitution de Altenpohl (1980)

La hiérarchie d'Altenpohl (1980) nous éclaire sur l'ensemble des niveaux de substitution des ressources naturelles au sein du système économique. L'auteur scinde cette hiérarchie en sept niveaux décrits ci-dessous :

- 1) Un changement d'objectif ou de valeur personnelle/sociale entraînant une modification de la demande
- 2) Un changement de stratégie pour atteindre les objectifs
- 3) Un changement du système via des moyens techniques permettant la mise en œuvre d'une stratégie
- 4) Un changement de sous-système grâce à une modification de la conception du système
- 5) Un changement de composant au travers d'un changement de conception
- 6) Un changement de matériaux pour un composant spécifique

2.3 Quelques exemples de scénarios prospectifs

Pour montrer l'ampleur du biais découlant d'une analyse sectorielle, les cas de la disponibilité physique en lithium et en cobalt vont être étudiés dans cette section via une analyse prospective fondée sur des scénarios produits en fonction des informations disponibles. Nous avons choisi ces métaux car les productions de lithium et de cobalt bénéficient en partie de l'essor des technologies liées à la transition énergétique. En effet, ces deux métaux jouent un rôle pivot dans la décarbonisation de nos économies : le lithium comme élément central du stockage de l'énergie et le cobalt comme matière incontournable dans de nombreuses activités énergétiques (batteries, catalyse, superalliage, matériaux durs pour forages, aimants...).

Afin d'établir la prospective, les demandes de lithium et de cobalt ont été scindées en différents secteurs d'usage (voir tableau ci-dessous).

Cobalt			
Usages	Recyclage	Durée de vie	Taux de récupération
Batteries	oui	5 ans	50%
Superalliages	non	/	
Matériaux durs	non	/	
Catalyseurs	oui	2 ans	95%
Rechargement / HSS et autres alliages	non	/	
Aimants	oui	10 ans	70%
Couleurs (verres, céramiques, plastiques)	non	/	
Adhésifs de pneus, savons, sèche-linge	non	/	
Aliments, biotechnologie, anodisation	non	/	
Batteries véhicules	oui	5 ans	70%

Tableau 6-1 Secteurs d'usages considérés pour le cobalt dans les scénarios de prospectives. Source : auteur

Lithium			
Usage	Recyclage	Durée de vie	Taux de récupération
Céramiques et verres	non	/	
Batteries	oui	5 ans	50%
Graisses lubrifiantes	non	/	
Aluminium	non	/	
Air conditionné	oui	10 ans	70%
Coulée continue	non	/	
Caoutchoucs et plastiques	non	/	
Pharmaceutiques	non	/	
Autres	non	/	
Batteries véhicules	oui	5 ans	70%

Tableau 6-2 Secteurs d'usages considérés pour le lithium dans les scénarios de prospectives. Source : auteur

Chaque secteur d'usage a fait l'objet de recherches de scénarios de prospectives pour déterminer son potentiel de long terme. En cas d'absence de scénario de prospective pour le secteur, la prévision de croissance du PIB mondial établie par l'OCDE (OECD, 2012) a été affectée au secteur. Le secteur des batteries pour véhicule a fait l'objet d'une attention particulière avec la construction d'un scénario propre (précis, plus détaillé, particulier). Dans ce cas, les ventes de véhicules électriques (EV) et les *plug-in électriques véhicules* (PHEV) ont fait l'objet de prévisions par l'IEA (2011). Les intensités en lithium et en cobalt par type de véhicule sont aussi fournies par l'UKERC (2013b)¹²⁷. Nous pouvons de cette manière

¹²⁷ Le scénario suppose une quantité de 3,5 kg de cobalt et 4,56 kg de lithium pour un véhicule de type PHEV (16 kWh) et une quantité de 8,8 kg de cobalt et 9,975 de lithium pour un véhicule de type EV (35 kWh).

reconstituer la demande future émanant de ce secteur. L'article de Yaksic et Tilton (2009) ainsi que l'analyse du TRU (2011) constituent les deux autres sources nous permettant d'établir des scénarios prospectifs pour la catégorie des « autres secteurs » tandis que le niveau des demandes et la répartition des usages pour le lithium et le cobalt ont été tirés des rapports de Roskill (2009) et du Cobalt Development Institute (2011). Nous avons également intégré la possibilité d'un recyclage dépendant du secteur (Angerer, 2009) et d'une baisse de l'intensité d'usage de 1% par an au niveau mondial¹²⁸.

Les différents scénarios optimistes (avec recyclage et baisse d'intensité d'usage) ou pessimistes (sans recyclage et sans baisse d'intensité d'usage) issus de cet exercice de prospectives montrent que le cobalt et le lithium vont probablement voir leur demande multipliée respectivement par un facteur situé entre 7 et 18 et 13 à 39 d'ici à 2050 (Figure 6-3). A titre de comparaison, une approche telle qu'employée par le JRC pour les seules énergies renouvelables et au niveau européen, reviendrait à étudier la demande européenne en lithium et en cobalt pour le secteur des transports électriques qui n'atteignent qu'une part marginale des besoins totaux (16 % et 6%). Au contraire, les progressions que nous indiquons, requièrent des investissements conséquents dans les infrastructures minières et de raffinages de métaux. De surcroît, le maintien d'un niveau de réserves acceptables va probablement exiger plus d'efforts en termes de dépenses d'exploration pour effectuer des découvertes et/ou plus de progrès techniques pour convertir les ressources identifiées en réserves. En effet, si on se base sur les ressources disponibles, en 2013 l'USGS fait état de réserves atteignant 7,5 Mt de cobalt et 13 Mt de lithium tandis que les ressources identifiées s'élèvent à 15 et 34 Mt respectivement. Si ces réserves ne sont pas renouvelées, le monde les aura probablement consommées d'ici 2033 à 2041 pour le cobalt et 2048 à 2081 pour le lithium. Pour maintenir un ratio Réserves/Production de 25 ans, niveau jugé comme minimum pour éviter une trop forte pression sur les prix, il faudra « prouver » jusqu'à 730 kt de cobalt par an et 260 kt de lithium d'ici à 2050 soit environ dix fois les productions annuelles actuelles des deux métaux.

¹²⁸ Cette hypothèse est très optimiste car l'intensité d'usage au niveau mondial du cobalt et du lithium est en progression depuis 20 ans.

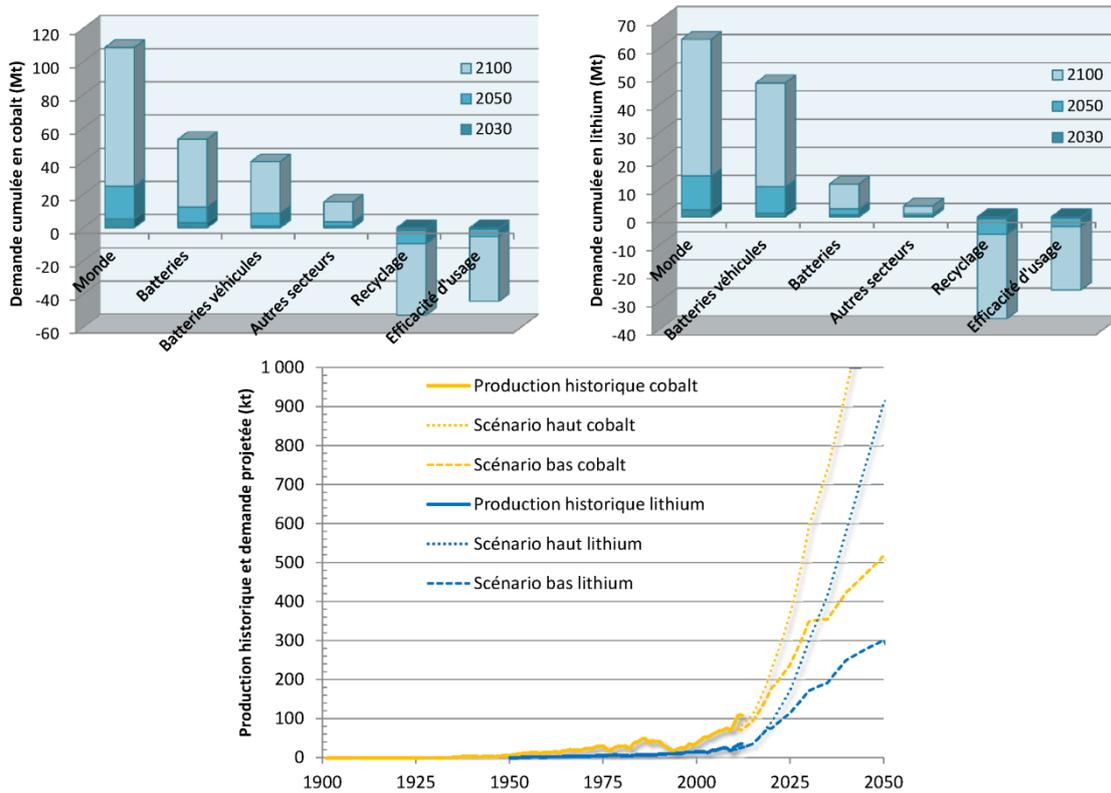


Figure 6-3 Principaux résultats issus de l'exercice de prospective. Source : calculs de l'auteur

En réalité, la situation doit être nuancée. D'une part, nous ne savons pas si le secteur des transports électriques particuliers se développera aussi vite que supposé ici. D'autre part, il existe des substituts connus au cobalt dans les batteries (manganèse, phosphates, nickel) et nous pouvons encore réduire la quantité de lithium par kWh de batteries. Dans cette situation, c'est donc plutôt la vitesse de croissance de la demande qui est déterminante, davantage que les quantités potentiellement extractibles de la croûte terrestre (voir Kushnir et Sandén, 2012). Ceci met en question l'intérêt de se focaliser sur l'épuisement physique car il se situe à un horizon de plusieurs siècles. En revanche, la question de l'épuisement économique est réelle car il s'évalue sur des intervalles allant de quelques décennies à un ou deux siècles. Cette zone d'épuisement économique est probablement à rechercher dans un périmètre situé entre 0,001% et 0,1% des ressources en place d'après l'UNEP (2011a). Les résultats issus de cette approche sont présentés par la Figure 6-4. En effet, compte tenu d'un certain nombre de contraintes abordées dans le chapitre trois, il demeure très improbable que nous récupérions une fraction importante des quantités présentes dans la croûte terrestre.

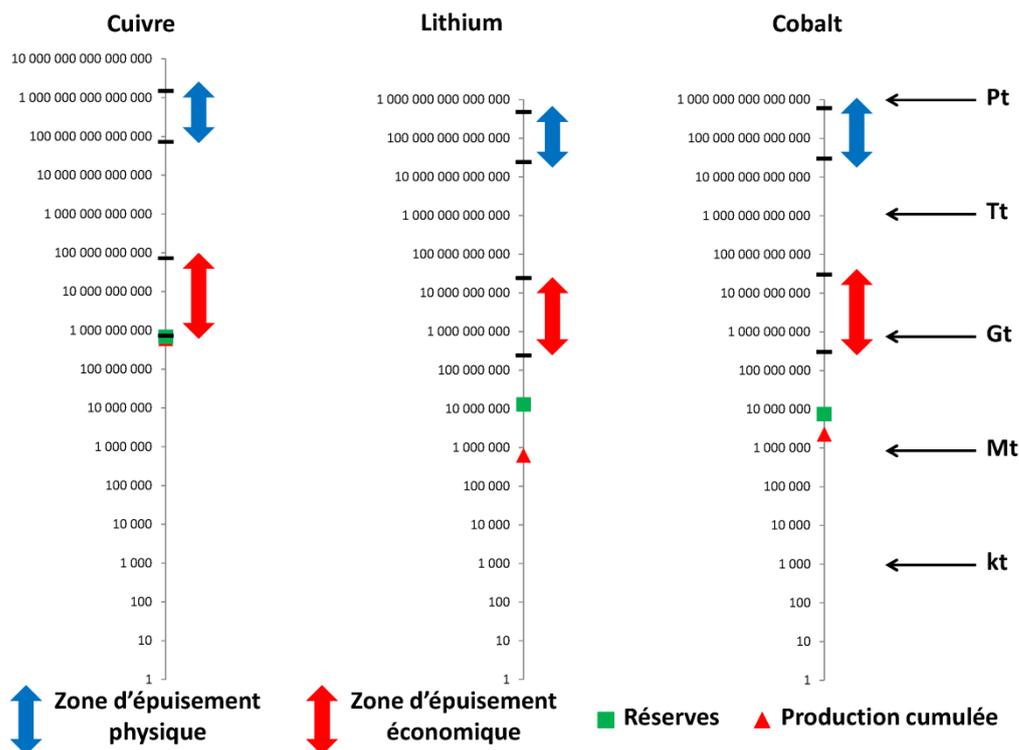


Figure 6-4 Zones d'épuisement physiques et économiques, réserves et productions cumulées de différents métaux. Source : calculs de l'auteur

L'épuisement économique relève davantage d'un phénomène qualitatif que quantitatif. Ainsi, l'épuisement économique d'un métal est associé à une dégradation qualitative des minerais plutôt que par un tarissement des quantités disponibles lorsque l'on peut considérer que les gisements de plus grande qualité sont mobilisés en premier (ce qui suppose ici que la notion de qualité comprend celle de la facilité d'extraction). Cet aspect qualitatif de l'épuisement est d'autant plus important à souligner qu'il entretient une relation très forte avec l'énergie (cf. chapitre 3). Or, si nous avons vu précédemment que les quantités de ressources en place de métaux étaient colossales, la qualité de la majeure partie de ces ressources est considérablement plus faible que les gisements actuellement exploités. Il reste donc à déterminer dans quelle mesure nous pourrions, avec suffisamment d'énergie, utiliser la fraction suivante. C'est pourquoi cet aspect qualité sera analysé en profondeur dans la troisième partie de ce chapitre.

3 Energie et métaux : une nouvelle lecture des perspectives associées à la transition énergétique

Dans cette troisième section de chapitre, nous verrons comment les énergies ont tendance à se dégrader qualitativement depuis le milieu du XXI^{ème} siècle grâce aux éclairages apportés par l'EROI¹²⁹. Nous reprendrons aussi les résultats issus de la littérature sur l'EROI pour comprendre comment la baisse de cet indicateur traduit l'évolution du surplus énergétique dégagé par nos sociétés. Puis nous analyserons ensuite comment les métaux subissent le même type d'évolution d'épuisement qualitatif et quelles implications cela peut avoir en termes d'énergie consommée. Enfin, nous estimerons quels types de conséquences peut avoir cet épuisement qualitatif sur le surplus énergétique dégagé par les énergies renouvelables.

3.1 Baisse tendancielle du surplus énergétique sociétal

Le ratio EROI permet de rapporter la quantité d'énergie qui a été utilisée comme input pour produire un output d'énergie. C'est une mesure qui rend compte de la déconcentration de nos énergies. La transition énergétique telle qu'elle est conçue aujourd'hui ne suffit pas à ralentir la dégradation constante de ce ratio, c'est-à-dire la contraction de l'abondance caractérisant nos économies de marchés (Greer, 2013). Le surplus énergétique dégagé avec les énergies concentrées se dégradent au fur et à mesure que l'on épuise les énergies fossiles, que l'on passe vers des énergies carbonées non conventionnelles et vers des énergies renouvelables diffuses. Ce constat a déjà été dressé et vérifié empiriquement au niveau des Etats-Unis (Cleveland, 2005 ; Hall et al., 2009) et, pour les hydrocarbures, à l'échelle du monde (Gagnon et al., 2009). Ces études ont montré par exemple que l'EROI du pétrole américain a chuté de 100 :1 en 1930 à 30 :1 en 1970 puis à 10-18 :1 en 2000. Ce qui signifie que l'extraction de cent barils de pétrole nécessitait en 1930 le réinvestissement d'un baril de pétrole pour assurer les besoins du système énergétique, alors qu'avec le même réinvestissement en 2000, on ne dégagait plus que de 10 à 18 barils de pétrole. D'autres études (Dale, 2010 ; Dale et al., 2011) ont montré qu'en intégrant à la fois l'effet de déplétion¹³⁰ des énergies renouvelables et le progrès technique, ces dernières présentent elles-aussi une phase de baisse de leur EROI.

¹²⁹ Energy Return On Investment. Voir le chapitre 3 pour plus de détail.

¹³⁰ On évoque ici, une baisse de l'EROI des sites d'éolien ou de photovoltaïque au fur et à mesure que l'on accapare les meilleurs gisements de vents et de soleil.

Par ailleurs, une baisse de l'EROI de 20 à 10 ne conduit pas aux mêmes conséquences qu'une chute de l'EROI de 10 à 5 : le raisonnement implique effectivement l'énergie nette (Murphy, 2011).

En effet, l'énergie nette est définie par :

$$\text{Energie nette} = E_{out} - E_{in} \quad (6-1)$$

Où E_{out} représente l'énergie en output et E_{in} l'énergie directe et indirecte en input.

Rappelons que le EROI est définie par :

$$\text{EROI} = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (6-2)$$

Or, en exprimant (6-2) en fonction de E_{in} et en la substituant dans (6-1), nous obtenons :

$$\text{Energie nette} = E_{out} - \frac{E_{out}}{\text{EROI}} \quad (6-3)$$

Cette équation peut ensuite être exprimée sous la forme :

$$\text{Energie nette} = E_{out} \times \left(1 - \frac{1}{\text{EROI}}\right) \quad (6-4)$$

Cette relation montre que l'énergie nette baisse très peu lorsque l'on évolue dans des phases où l'EROI est compris entre 8 et plus alors qu'à contrario, l'énergie nette diminue très rapidement lorsque l'EROI se situe dans la plage entre 8 et 1 (cf. Figure 6-5). Cette analyse met en lumière l'existence d'un « *net energy cliff* » qui a donné lieu à une représentation graphique reprise et modifiée dans la Figure 6-5 (voir Mearns, 2008).

Une autre manière d'évaluer les conséquences consiste à percevoir l'évolution de l'énergie output en fonction du ratio EROI nécessaire pour maintenir la même quantité d'énergie nette, soit :

$$1 = E_{out} \times \left(1 - \frac{1}{\text{EROI}}\right) \quad (6-5)$$

Ce qui peut être reformulé sous la forme :

$$E_{out} = \frac{1}{1 - \frac{1}{\text{EROI}}} \quad (6-6)$$

A l'inverse du « *net energy cliff* », cette équation montre l'effort quantitatif qu'il faudrait réaliser en termes de E_{out} à extraire pour compenser la baisse de l'EROI (voir Figure 6-5).

Les études comparatives statiques sur les EROI des énergies renouvelables et des énergies fossiles (voir Hall et al. (2014) pour un état de l'art complet de ces études) montrent qu'il est difficile, compte tenu de la disponibilité des données, de réaliser des études dynamiques de cet indicateur.

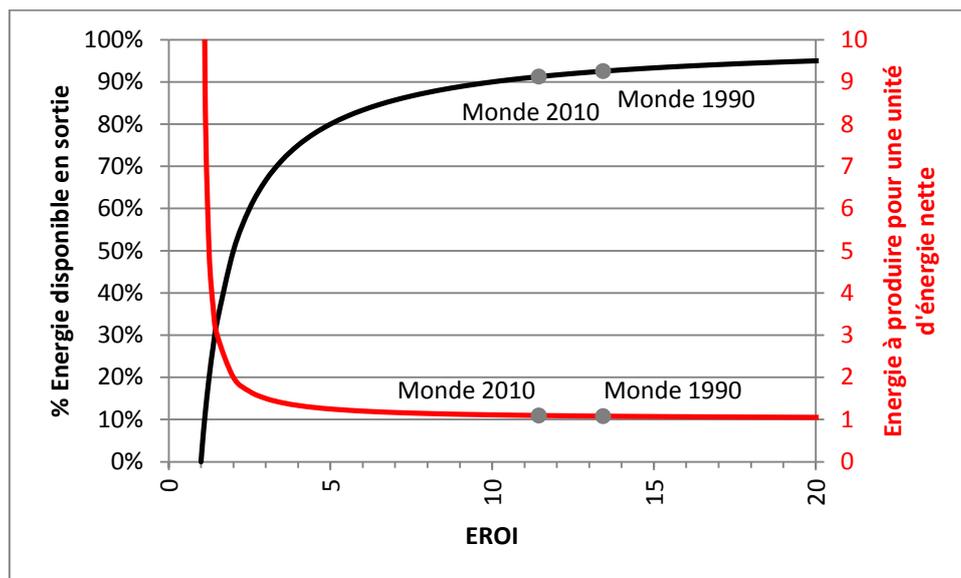


Figure 6-5 Evolution de l'énergie nette (échelle de gauche) et de l'énergie à extraire pour maintenir l'énergie nette en fonction de l'EROI (échelle de droite). Source : Données Enerdata et calculs de l'auteur

Par conséquent, calculer un EROI sociétal au niveau mondial est quasi impossible du fait de l'absence de données temporelles sur l'évolution de l'EROI des énergies renouvelables et du charbon au niveau mondial. De même, nous manquons également de données sur l'évolution annuelle de l'énergie investie dans le secteur énergétique. Une solution possible à ce problème serait d'utiliser les données monétaires pour ensuite les reconvertir en unités physiques. En effet, nous disposons de données sur l'énergie out (énergie finale et primaire) du secteur énergétique. Enerdata fournit également des chiffres sur les dépenses monétaires mondiales effectuées dans le secteur énergétique¹³¹. Nous pouvons ensuite grâce au recours à l'intensité énergétique mondiale (Energie totale consommée/PIB mondial) reconvertir ces dépenses en consommation énergétique :

¹³¹ Ces dépenses sont des dépenses au niveau du consommateur final (particulier ou industriel). Elles sont obtenues par pays en multipliant les quantités d'énergies consommées par les prix des énergies consommées puis converties en parité de pouvoir d'achat.

$$EROI_{soci\acute{e}tal} = \frac{E_{out}}{D_m \times I_e} \quad (6-7)$$

Où D_m représente les dépenses monétaires mondiales (en \$2005 PPA) effectuées dans le secteur énergétique et I_e , l'intensité énergétique d'un dollar de PIB (en \$2005 PPA)¹³². Comme les données d'Enerdata ne recouvrent que deux années 1990 et 2010, on ne peut donc calculer la valeur de l'EROI mondial que pour ces mêmes années (cf. Figure 6-5). Sur ce point, on remarque que l'EROI sociétal au niveau mondial a chuté de 13,433 à 11,446 en vingt ans. Ceci veut dire qu'en 2010 le secteur énergétique mondial consommait pour son propre fonctionnement, 8,7% de l'énergie qu'il produisait, contre 7,4% en 1990. Dit autrement, en vingt ans l'énergie nette parvenant à la société au niveau mondial a connu une baisse de 1,4%. Nous ne pouvons toutefois pas qualifier si cette baisse est progressive et/ou constante. Il faut également souligner la présence de trois biais potentiels dans ce type de construction de l'EROI sociétal :

- Un biais de qualité de l'énergie dont l'effet total est indéterminé. Le biais apparaîtrait comme nul uniquement si la structure du mix énergétique en input et en output de l'EROI est identique, ce qui est peu plausible.
- Un biais sectoriel attaché à l'intensité énergétique. L'intensité énergétique moyenne au niveau mondial est probablement inférieure à l'intensité énergétique du secteur énergétique nous conduisant à surestimer l'EROI réel.
- Un biais de périmètre car les dépenses sont évaluées au niveau du consommateur final. Elles incluent donc les investissements et les coûts variables mais aussi les rentes, les taxes, les subventions et l'ensemble des distorsions de marché. Ce biais nous conduit à sous-estimer l'EROI réel.

On peut néanmoins supposer pour l'avenir, que le surplus énergétique unitaire dégagé par le secteur énergétique sera probablement plus faible, et que le maintien d'une quantité d'énergie nette constante parvenant à la société ne pourra se faire qu'au prix d'un investissement énergétique plus important dans le secteur énergétique¹³³. Si on englobe les métaux, compte tenu de leur intégration dans le système énergétique, la question de la transition énergétique interroge celle du coût énergétique de la production des métaux.

¹³² Les dépenses monétaires mondiales dans le secteur de l'énergie sont évaluées à 2700 G\$ (\$2005 PPA) en 1990 et 6400 G\$ (\$2005 PPA) pour 1990 et 2012 respectivement d'après Enerdata, tandis que l'intensité énergétique mondiale passe d'environ 0,226 kilo d'équivalent pétrole par \$2005 PPA en 1990 à 0,17 en 2012.

¹³³ On parle alors d'une dégradation de l'énergie nette.

3.2 Coût énergétique de la production de métaux et conséquences découlant de leur épuisement

Les secteurs d'extraction et de production des métaux représentent aujourd'hui une part conséquente de l'utilisation finale de l'industrie et de l'utilisation d'énergie finale globale.

En effet, Rankin (2011) estime à environ 10%, la part d'énergie primaire mondiale produite à destination du secteur des métaux. Les données de l'IEA (2014) et de Norgate et Jahanshahi (2011) indiquent des fractions plus modestes de l'ordre de 7%. En tenant compte de la consommation moyenne individuelle de chaque métal (données issues de plusieurs travaux de recherche : Valero et Botero, 2002 ; Glaister et Mudd, 2010 ; Rankin, 2011 ; Schmidt, 2012 ; Singh, 2011 ; Tharumarajaha et Koltunb, 2011) et de la production mondiale de chaque métal (données de l'USGS), nous avons estimé une part proche de 10%¹³⁴.

Réciproquement d'autres auteurs ont montré qu'une part conséquente de la production des métaux est dédiée au secteur de l'énergie. Ainsi, Bihoux et De Guillebon (2010) évaluent à 5-10 % la part de la production mondiale d'acier absorbée par le secteur de l'énergie. Les parts individuelles de chaque métal accaparées par la production d'énergie sont probablement très différentes selon la nature du métal.

Plutôt que de simplement observer la part d'interdépendance entre le secteur des métaux et celui de l'énergie, il peut être intéressant d'en saisir la dynamique. En termes de perspectives, l'analyse de Norgate et Jahanshahi (2011) de la consommation énergétique des métaux à l'horizon 2030, intégrant à la fois un effet volume (hausse de la production) et un effet qualité (dégradation de la teneur), montre que la part relative de la consommation énergétique des métaux devrait gonfler de 40% dans la consommation énergétique totale¹³⁵.

A partir du bilan de flux énergétiques (*Energy Balance Flows*) établi chaque année par l'IEA (2014)¹³⁶, nous pouvons parvenir à deux constats. (Figure 6-6). Un premier constat repose sur le fait que la consommation énergétique de la production des métaux ferreux mais aussi non ferreux a progressé plus vite que la moyenne globale des secteurs. L'effet volume (existant dans tous les secteurs) ne peut en être le seul facteur explicatif car un second constat consiste

¹³⁴ Les chiffres détaillés sont reportés en annexes.

¹³⁵ La prévision de la consommation énergétique totale à 2030 s'appuie sur les prévisions du BP Energy Outlook 2035.

¹³⁶ L'un des avantages de ce bilan est qu'il sépare l'activité minière de l'activité de production des métaux.

à observer que la consommation énergétique de l'activité minière a augmenté deux fois plus vite que la consommation d'énergie finale globale. On retrouve ici les conséquences liées à l'épuisement et la dégradation qualitative des minerais.

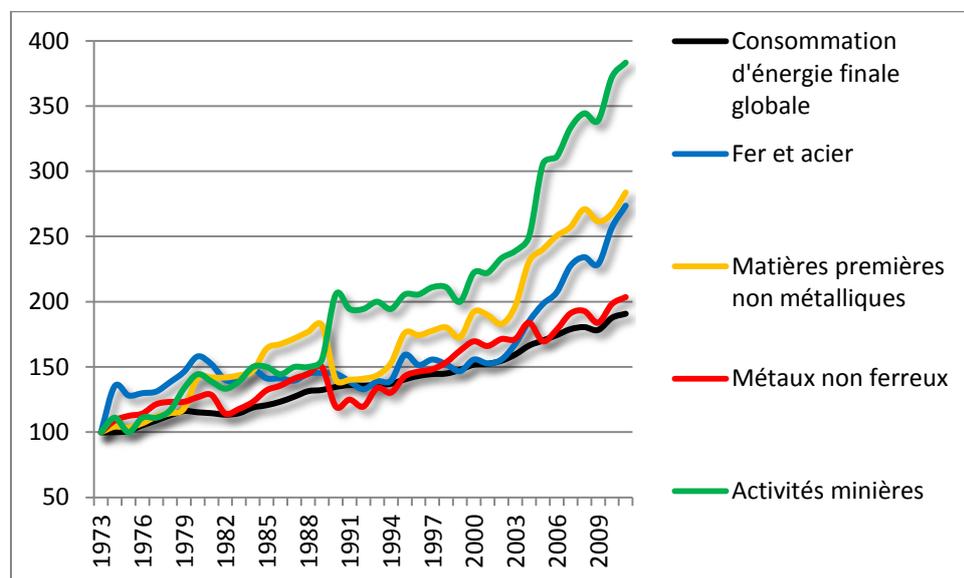


Figure 6-6 Evolution de la consommation finale de différents secteurs en indice (base 100=1973), Source : données IEA, calculs de l'auteur

Plusieurs études permettent de documenter cette relation. La dégradation qualitative des minerais se manifeste lorsque l'on se penche sur la teneur moyenne des minerais à l'échelle d'un gisement (Crowson, 2012), d'un pays (Mudd, 2010) ou du monde (Crowson, 2012 ; Schodde, 2010). Il existe une relation inverse de type puissance entre teneur d'un gisement et quantités d'inputs et d'outputs nécessaires à l'extraction et à la production d'un métal (eau, déchets, énergie et émissions de CO₂). Cette relation est bien documentée pour le cuivre, le nickel et l'uranium (Mudd et Diesendorf, 2008 ; Memary et al., 2012 ; Northey et al., 2013 ; Norgate et Jahanshahi, 2010). Il nous a paru important d'étendre cet exercice au cas des métaux en général.

L'impact de l'épuisement d'un métal en termes énergétiques n'est pas identique selon les métaux. Pour être exploité économiquement, les métaux requièrent un degré de concentration plus important que leur état moyen dans la croûte terrestre. Suite à des procédés naturels géochimiques dispensés au travers de millions d'années, la nature a concentré une part infime des métaux dans des gisements où ils apparaissent à une concentration élevée. Cette concentration s'exprime sous la mesure de teneur et reste souvent 100 à 10000 fois supérieure à l'occurrence des mêmes métaux dans les roches communes de la croûte terrestre. Ce facteur de concentration a été évalué dans différentes études (Craig et al., 2001 ; Valero et Botero,

2002 ; Rankin, 2011) et prend souvent le nom de *Clarke Value*¹³⁷. Plus cette valeur atteint des niveaux élevés et plus l'épuisement du métal nous exposera à une chute importante de la teneur d'exploitation et donc à un emballement de la consommation énergétique unitaire.

Nous excluons de notre analyse, les métaux géo-chimiquement abondants¹³⁸ tel que l'a fait Skinner (1976) ainsi que la classification de Craig et al (2001). D'une part, ces métaux sont très abondants et il faudrait donc exploiter des quantités tout simplement colossales pour faire diminuer leur teneur d'exploitation. D'autre part, du fait de leur abondance moyenne dans la croûte terrestre (supérieure à 1%), ces métaux détiennent des *Clarke Value* très faibles donc un potentiel d'accroissement de la consommation énergétique unitaire limité. A titre d'exemple, la teneur d'exploitation minimale du fer se situe aujourd'hui autour de 25%, alors que sa concentration moyenne dans la croûte terrestre est seulement cinq fois plus faible.

Nous constatons, que la production actuelle et donc l'effet d'épuisement montre un fort déséquilibre en faveur des métaux géologiquement rares (Figure 6-7). La figure ci-dessous montre que la production cumulée et les réserves des métaux géologiquement rares représentent une part plus élevée de leur abondance naturelle dans les trois premiers kilomètres de la croûte terrestre (lignes noires). Nous pouvons également voir que la façon dont nous épuisons ces métaux géologiquement rares est plus rapide que pour les métaux communs (passage de la ligne verte à la ligne rouge). Cela signifie que notre production n'est pas proportionnelle à l'abondance des métaux et que nous épuisons plus rapidement les métaux comme l'or, le cuivre ou le nickel que des métaux communs comme l'aluminium ou le fer.

¹³⁷ Du nom du géochimiste F. W. Clarke.

¹³⁸ On désigne par métaux géo-chimiquement : le fer, l'aluminium, le silicium, le magnésium, le manganèse, et le titane.

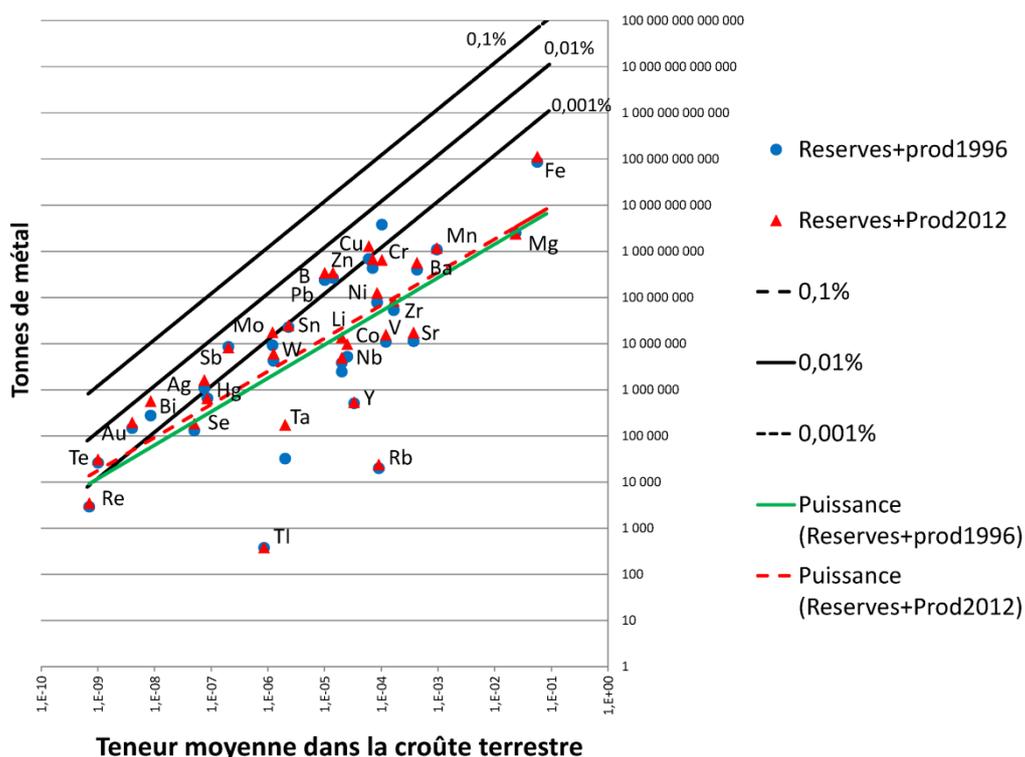


Figure 6-7 Evolution de l'épuisement de différents métaux en fonction de leurs ressources en place. Données USGS, calculs de l'auteur

Nous avons désormais mis en lumière un certain nombre de mécanismes d'épuisement affectant l'énergie et les métaux dans les sous-sections précédentes. Nous allons maintenant voir comment ceci peut amener à un circuit de rétroaction positive entre l'épuisement des métaux et la déconcentration de nos énergies.

La rationalité économique implique que les meilleurs sites énergétiques (dont les coûts sont les plus faibles) rentrent en exploitation en premier. Si en pratique, ce phénomène est certainement contestable à court terme, notamment au niveau mondial, nous pouvons déjà l'observer au niveau interne des états ayant déjà installé une capacité importante de renouvelables¹³⁹. De la même manière, nous pouvons penser qu'à moyen-long terme ce raisonnement s'applique au niveau mondial pour les énergies renouvelables, de même que pour les gisements d'énergies fossiles. Toute demande d'énergie supplémentaire va donc se traduire par des nouvelles énergies aux rendements inférieurs. Ce sont les rendements marginaux décroissants de Ricardo (1817).

¹³⁹ Si on s'intéresse au potentiel interne des renouvelables à l'échelle nationale, l'exploitation des renouvelables comme l'éolien suit bien cette loi des rendements décroissants (exploitation prioritaire des sites les plus ventés et réguliers). Ce qui explique d'ailleurs pourquoi le facteur de charge de l'éolien français est encore beaucoup plus élevé que son homologue allemand.

En résumé, il apparaît que les énergies à notre disposition ont une tendance à dégager un surplus énergétique plus faible alors même que les technologies s'améliorent. Ces mêmes énergies nécessitent aussi une quantité croissante de métaux (métaux de base, métaux rares, métaux précieux...). Or, nous exploitons une quantité toujours plus importante des métaux géologiquement rares, qui s'épuisent et réclament pour leur production une quantité d'énergie elle aussi croissante. L'effet demande et l'effet épuisement conduisent à une dégradation supplémentaire de l'EROI moyen du système énergétique (Figure 6-9).

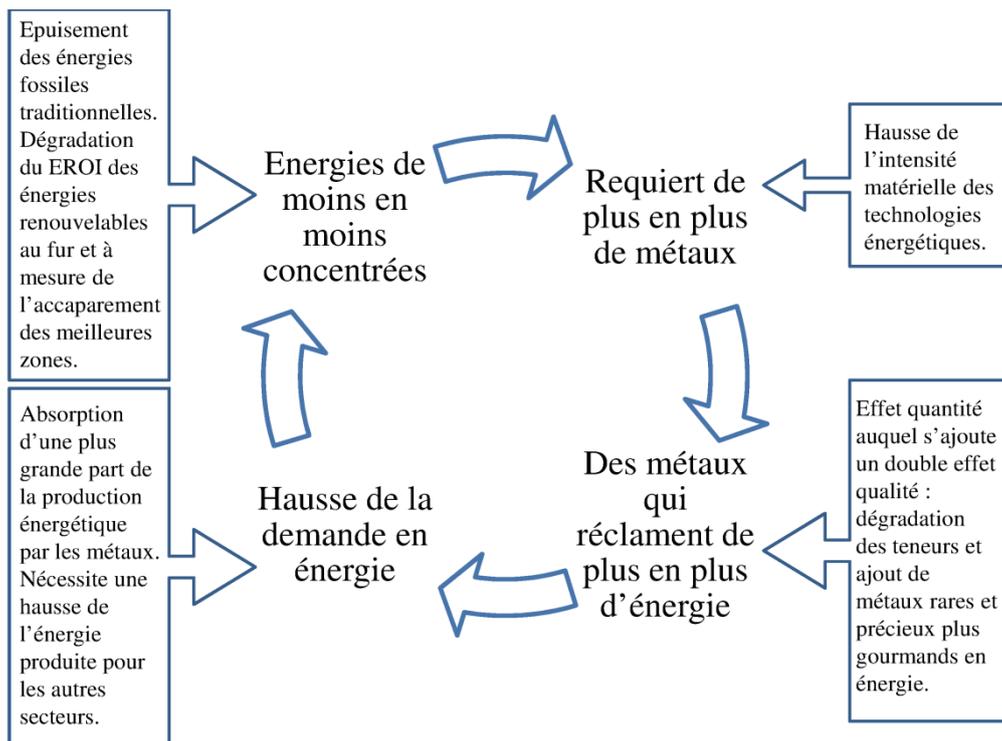


Figure 6-8 Circuit de l'épuisement des métaux et de la déconcentration des énergies. Source : auteur

Une optique intéressante consisterait à modéliser cette boucle pour apprécier une évolution à très long terme.

4 Déconcentration de l'énergie et des métaux : une perspective de très long terme

L'objectif de cette sous section, est de modéliser l'impact de l'épuisement des métaux sur le surplus énergétique dégagé par les énergies renouvelables. Nous définissons de cette manière si la trajectoire de la transition énergétique actuelle pourrait être soutenable à long terme. Pour ce faire, nous revenons sur les études s'étant penchées sur cette problématique. Nous cherchons ensuite à estimer l'impact de l'épuisement du cuivre à l'horizon 2050 sur le EROI

de différentes énergies renouvelables (éolien, plusieurs technologies de photovoltaïques, solaire thermodynamique) afin de recouper nos données et nos résultats avec l'étude de référence établie sur la question (Harmsen et al. (2013)). Pour finir, nous élargissons cette analyse à l'ensemble des métaux géochimiquement rares sur un horizon de très long terme afin d'observer comment cet impact est amené à évoluer, puis discutons de la pertinence de ces résultats (horizon temporel, limites...) et des leviers d'action potentiels.

4.1 *Etudes modélisant l'impact de l'épuisement des métaux à très long terme*

A notre connaissance, il n'existe que peu d'études qui se sont penchées sur la question. Skinner (1976) a montré que nous épuisons plus rapidement les métaux géologiquement rares et que l'exploitation de ces derniers se heurterait probablement à une barrière minéralogique qui décuplerait les besoins en énergie sous un certain seuil de teneur du gisement. Par conséquent, nos économies se dirigeraient vers une substitution massive de la plupart des métaux par des métaux communs : un nouvel âge du fer. D'une manière différente, Steen et Borg (2002) ont évalué le coût d'exploitation économique des métaux à partir de leur concentration moyenne dans la croûte terrestre tout en intégrant également les coûts externes. Dans ces conditions, la plupart des métaux ont des coûts économiques plusieurs fois supérieurs aux coûts actuels (de 10 à 10 000 fois)¹⁴⁰. Or le progrès technique jusqu'à aujourd'hui n'a jamais offert d'aussi considérables opportunités de réduction des coûts dans le secteur des métaux. Harmsen et al. (2013) s'intéressent au cas particulier de l'épuisement du cuivre à l'horizon 2050 et du secteur de l'éolien. Ils montrent que l'EROI de l'éolien sera très peu impacté par l'épuisement du cuivre à 2050 mais que les pertes énergétiques sur les réseaux pourraient au contraire faire diminuer l'EROI de l'ordre de 15%.

4.2 *Impact de l'épuisement du cuivre à l'horizon 2050 sur l'EROI de différentes technologies d'énergies renouvelables*

Nous avons vu précédemment que nous connaissons l'évolution moyenne de la teneur en cuivre des gisements mondiaux ainsi que la quantité d'énergie unitaire requise selon la teneur du gisement. Une première étape consiste à reconstruire la courbe de production de cuivre cumulée au niveau mondial depuis nos origines. De -4000 à 1800 nous reprenons les chiffres avancés par Hong et al. (1996) puis ceux de l'US Department of Commerce (1928) de 1800 à 1900 pour enfin finir par les données de l'USGS de 1900 à 2012. Nous pouvons en déduire une relation entre production cumulée et diminution de la teneur en cuivre. Nous retenons une

¹⁴⁰ Une limite de cette étude est qu'elle considère que les inputs nécessaires à la production des métaux à partir de la croûte terrestre sont fabriqués avec des métaux aux coûts d'aujourd'hui.

spécification de type logarithmique où la production cumulée fait baisser la teneur en cuivre mais moins que proportionnellement. Cette courbe a l'avantage de couper l'axe des abscisses, ce qui signifie qu'elle suppose une quantité finie de ressources.

Nous effectuons ensuite des prévisions sur la production cumulée future basées sur l'équation dit IPAT qui décompose la consommation en cuivre entre un effet population, un effet d'affluence économique (PIB/tête) et un effet progrès technique (intensité en cuivre par unité de PIB). Le recyclage du cuivre est également intégré avec son niveau actuel (50%). En prolongeant ces trois variables grâce à un jeu d'hypothèses (Tableau 6-3), nous pouvons faire des prévisions sur la consommation future de cuivre. Les hypothèses retenues pour la croissance économique sont celles du FMI et de l'ONU pour la population mondiale. Nous avons fait le choix de retenir trois variations d'intensité en cuivre du PIB différentes (0%, -0,5%, -1% par an) qui correspondent aux différents trends de l'intensité en cuivre historiquement. Nous pouvons ensuite en déduire une évolution de la teneur en cuivre donc de la consommation énergétique unitaire par tonne de cuivre. En connaissant les intensités en cuivre des différentes technologies énergétiques (Pihl et al., 2012 ; Ecoinvent ; Chiffres internes EDF), nous pouvons calculer la baisse de leur EROI imputable à la hausse du coût énergétique du cuivre (Figure 6-9). Quelque soit la technologie (éolien, plusieurs technologies de photovoltaïque, solaire thermodynamique, hydraulique, nucléaire¹⁴¹), nos calculs montrent un impact assez faible sur l'EROI final, du même ordre de grandeur que Harmsen et al. (2013) (Figure 6-9).

Scénario	Intensité PIB en cuivre	Croissance du PIB	Population	Recyclage
Pessimiste	0%/an	FMI 3%/an	ONU	50%
Médian	-0,5%/an	FMI 3%/an	ONU	50%
Optimiste	-1%/an	FMI 3%/an	ONU	50%

Tableau 6-3 Hypothèses retenues selon les scénarios. Source : auteur

¹⁴¹ L'impact sur le nucléaire est également considéré dans la mesure où le développement de cette énergie est souvent évoqué pour lutter contre le réchauffement climatique. Cependant, nous n'intégrons pas le coût énergétique de l'épuisement de l'uranium.

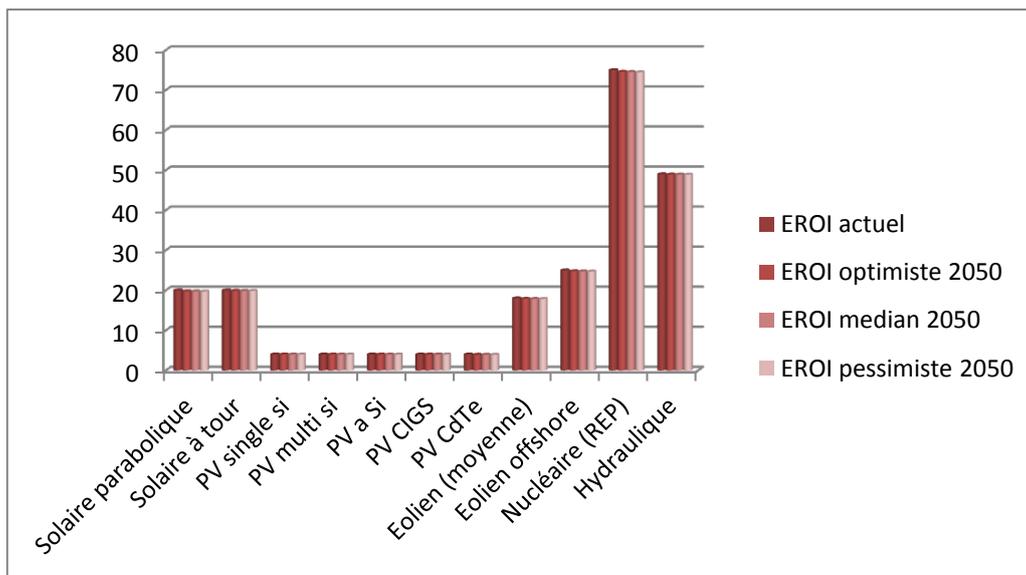


Figure 6-9 Evolution des EROI de différentes énergies renouvelables d'ici à 2050 en prenant en compte l'épuisement du cuivre. Source : calculs de l'auteur

4.3 Impact de l'épuisement des métaux sur l'EROI de différentes technologies d'énergies renouvelables à très long terme

L'évolution de l'EROI de ces énergies est maintenant calculée en considérant, en plus du cuivre, les autres métaux géologiquement rares, à leur concentration moyenne dans la croûte terrestre. Ce niveau de concentration moyen d'un métal dans la croûte terrestre correspondrait à un niveau d'épuisement qualitatif de celui-ci à un horizon de très long terme. Les travaux menés sur la teneur d'exploitation de 39 métaux (Craig et al., 2001 ; Valero et Botero, 2002 ; Rankin, 2011) et sur la consommation énergétique unitaire associée à ces derniers (cf. section 3.2 de ce chapitre), laisse apparaître une très forte corrélation suivant une relation de type puissance similaire à celle établie sur le cuivre par Norgate et Jahanshahi (2010). L'observation de la relation unissant la teneur et la consommation énergétique unitaire au niveau de ces 39 métaux (Figure 6-10), permet de faire l'hypothèse que les autres métaux suivent le même type de relation que le cuivre. Nous pouvons ensuite obtenir grâce à ces relations, la connexion entre la *Clarke Value* (p.286) et le facteur de multiplication de la consommation énergétique unitaire d'un métal (Figure 6-11).

En effet, nous connaissons la relation qui unit la teneur d'un gisement (τ) à sa consommation énergétique unitaire par tonne (ε_i). Celle-ci suit la relation suivante :

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\tau^\alpha} \tag{6-8}$$

Avec α définissant la forme de la relation générale estimée sur nos données. Nous souhaitons savoir comment est modifiée la consommation énergétique unitaire lorsque l'on divise la teneur d'un gisement par un multiple égal à sa Clarke Value (θ) :

$$\varepsilon_f = \frac{1}{\left(\frac{\tau}{\theta}\right)^\alpha} \quad (6-9)$$

Ce qui peut être reformulé par l'équation suivante :

$$\varepsilon_f = \frac{1}{\tau^\alpha} \times \theta^\alpha \quad (6-10)$$

Comme c'est le facteur potentiel de multiplication de la consommation énergétique qui nous intéresse, nous divisons (6-10) par (6-8), ce qui nous permet d'obtenir la relation entre multiplication de la consommation énergétique unitaire par tonne et la baisse potentielle de la teneur (exprimée ici par la Clarke Value) :

$$\mu = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_i} = \theta^\alpha \quad (6-11)$$

Cette relation montre qu'un métal dont la concentration économique minimale actuelle est par exemple 10 000 fois supérieure à sa teneur moyenne dans les roches communes nécessiterait environ 2600 fois plus d'énergie qu'actuellement pour être produit à partir de cette source.

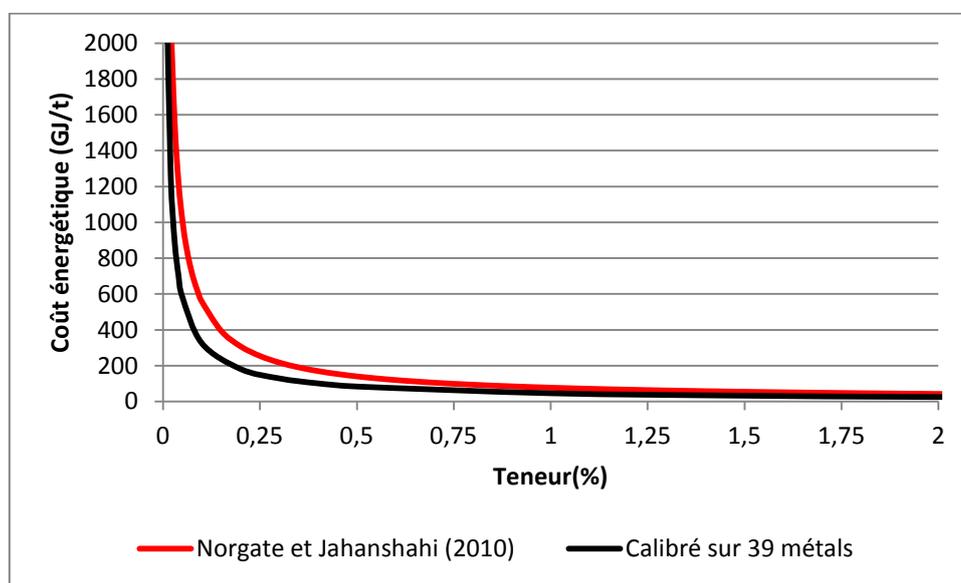


Figure 6-10 Relation entre la teneur et la consommation énergétique unitaire d'un métal. Source : Données Norgate et Jahanshahi (2010) et calculs de l'auteur

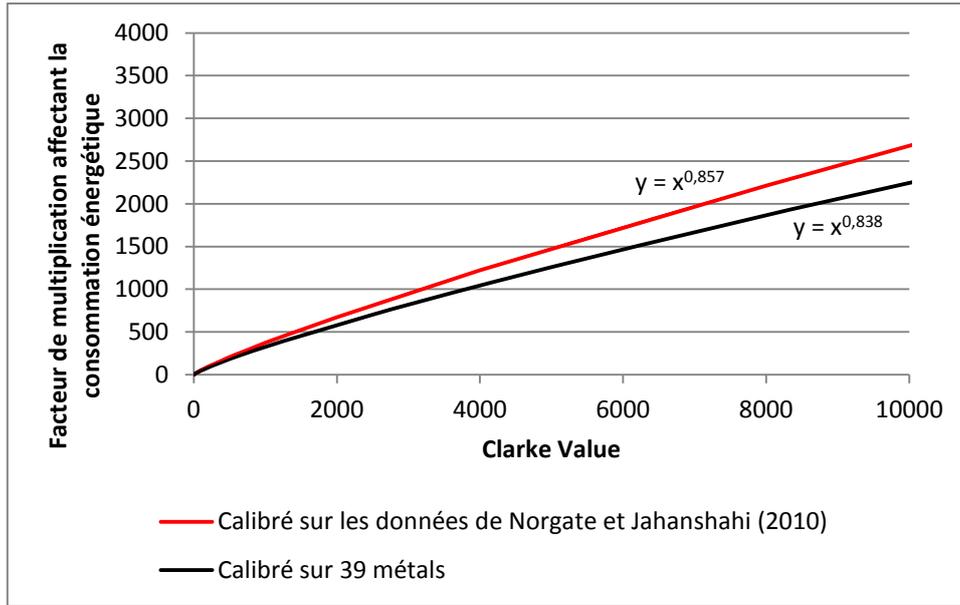


Figure 6-11 Relation entre le facteur de concentration et le facteur de multiplication de la consommation énergétique unitaire. Source : calculs de l'auteur

En utilisant les intensités en métaux des différentes formes d'énergies renouvelables (Pihl et al., 2012 ; Ecoinvent ; Chiffres internes EDF)¹⁴², nous pouvons établir les EROI des systèmes énergétiques utilisant des métaux extraits à partir des roches communes (Figure 6-12).

Plus formellement, pour chaque MW de technologie renouvelable installé, nous considérons k métaux différents, puis nous définissons λ_{actuel} , comme le ratio de l'énergie investie pour l'extraction de chaque métal, $E_{métaux,actuel}$ (obtenue en combinant l'annexe 6.1 et l'annexe 6.2) sur l'énergie totale intégrée en input dans le système énergétique :

$$\lambda_{actuel} = \frac{\sum_k E_{métaux,actuel,k}}{E_{in}} \quad (6-12)$$

L'énergie investie pour extraire un métal donné sera maximale lorsque celui-ci sera extrait à sa concentration moyenne dans la croûte terrestre. Avec μ_k , défini comme le facteur de multiplication affectant la consommation énergétique unitaire du métal k lorsque sa teneur parvient à sa concentration moyenne dans la croûte terrestre. Nous pouvons définir λ_{futur} , comme le ratio de l'énergie future investie dans les métaux à partir de roches communes sur l'énergie totale intégrée dans le système énergétique :

$$\lambda_{futur} = \frac{\sum_k \mu_k * E_{métaux,actuel,k}}{E_{in}} \quad (6-13)$$

¹⁴² Les intensités en métaux des différentes technologies sont représentées dans l'annexes 6.2.

Finalement, il est possible de calculer le potentiel futur EROI pour chaque type d'énergie renouvelable, sous l'hypothèse que les métaux nécessaires à la construction du système soit extraits à partir de leur teneur moyenne dans la croûte terrestre :

$$EROI_{futur} = \frac{EROI_{actuel}}{1 - \lambda_{actuel} + \lambda_{futur}} \quad (6-14)$$

Ces résultats généralisés se révèlent différents de ceux obtenus précédemment. Ainsi, la plupart des énergies ne produisent plus aucun surplus énergétique tant les métaux qu'elles utilisent nécessitent de l'énergie pour être produits. Même l'éolien qui conserve tout de même un EROI supérieur à trois, dégage un surplus énergétique faible et insuffisant pour soutenir nos sociétés si on prend en compte également les besoins énergétiques de la transmission, distribution et utilisation de cette énergie. Ainsi sur cette question, Hall et al. (2009) considèrent qu'un EROI sociétal de 5 semble être un seuil minimum pour soutenir l'ensemble des secteurs de nos économies actuelles. D'une manière similaire, King et Hall (2011) ainsi que Heun et De Wit (2012) ont montré que l'EROI entretient une relation non linéaire de long terme avec les prix de marché de l'énergie. D'après l'estimation de Heun et De Wit (2012), un EROI de 3,7 :1 correspondrait à un prix de l'énergie de 300\$ (2010) par baril de pétrole. Par conséquent, ces trois études tendent à confirmer l'insoutenabilité d'EROI aussi faibles (inférieurs à 4) que ce soit pour des raisons énergétiques ou économiques.

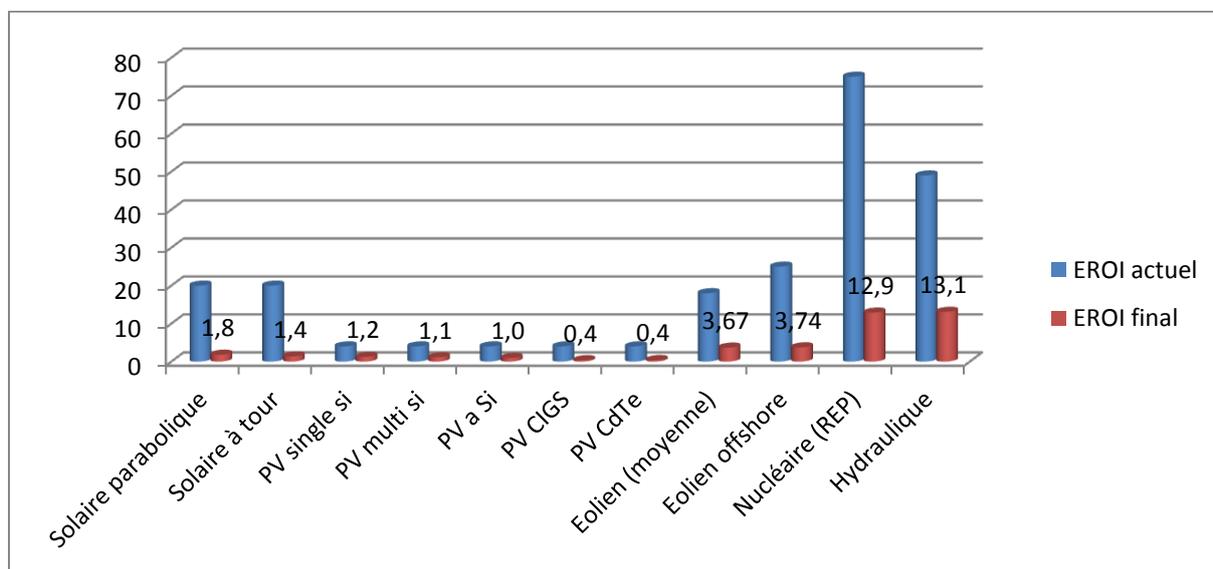


Figure 6-12 Evolution de l'EROI de différentes énergies sous l'hypothèse d'une production de métaux à partir de roches communes. Source : calculs de l'auteur

Une autre possibilité consiste à s'affranchir des hypothèses sur le niveau de la teneur d'exploitation de long terme des métaux, en observant la sensibilité des différents EROI à la

baisse généralisée de la teneur des gisements des métaux. Cette sensibilité est représentée par la Figure 6-13. Là encore, nous observons un impact limité de l'épuisement qualitatif des métaux sur les EROI des énergies pour une plage allant de 1 à 0,1. Au contraire, pour un épuisement plus avancé (plage de 0,1 à 0,001) les EROI baissent beaucoup plus rapidement. En d'autres termes, la division jusqu'à un facteur 10 des teneurs d'exploitations actuelles en métaux influe de manière modérée sur les EROI, alors que des divisions plus importantes des teneurs font chuter plus vite l'indicateur.

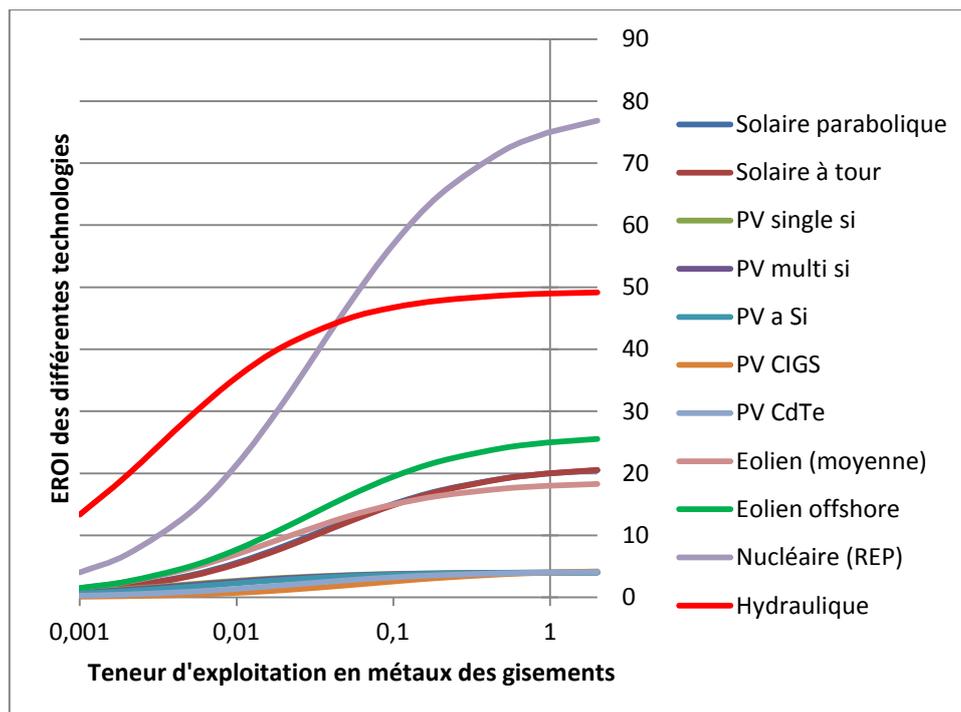


Figure 6-13 Evolution de l'EROI de différentes énergies selon le degré d'épuisement des gisements de métaux mondiaux. Lecture : une teneur d'exploitation de 0,1 signifie que la teneur moyenne des gisements de métaux considérée est dix fois plus faible qu'actuellement. Source : *calculs de l'auteur*

4.4 Discussion

Reste à déterminer à quelle vitesse nous nous dirigeons vers cet état d'appauvrissement des métaux. Nous ne pouvons pas, en l'état des connaissances actuelles, apporter de réponse définitive à cette question mais seulement fournir un ordre d'idée. Les quantités de métaux présentes dans la croûte terrestres sont gigantesques mais seule une infime portion est concentrée de manière suffisante pour détenir une valeur économique. D'un autre côté, nos prélèvements restent relativement modestes en comparaison du volume de métal contenu sur les 3 premiers kilomètres de notre croûte terrestre mais ils accélèrent sans cesse depuis 1800

(un facteur 1000 en 200 ans !) et il n'existe aucun signe de découplage absolu¹⁴³ entre croissance économique et prélèvements en métaux (Krausmann et al., 2009 ; Steinberger et al., 2010). L'épuisement physique des métaux, dans les conditions actuelles, se situe à quelques siècles de nous (500 ans au maximum) et aucune étude n'a réussi pour l'instant à préciser l'horizon temporel de l'épuisement économique. Le cuivre possède une des vitesses de prélèvement les plus rapides (avec l'or, le plomb, l'argent, le tellure) mais d'autres métaux dont les contributions sont pour l'instant faibles connaissent une croissance de cette vitesse de prélèvement à deux chiffres (lithium, cobalt...) ¹⁴⁴.

Cette étude comporte toutefois un certain nombre de limites qui pourront être corrigées ou atténuées dans de futurs travaux. Certaines de ces limites ont tendance à nous faire sous-estimer les véritables résultats. En effet, cette étude ignore d'autres facteurs pouvant accélérer les problèmes identifiés, parmi lesquelles on trouve :

- La barrière minéralogique de Skinner (1976). Rien n'assure que la relation entre la teneur et la consommation d'énergie unitaire soit continue. Ce géologue estime que sous un certain seuil, les métaux ne sont plus présents sous la forme de « grains » dans le minerai mais apparaissent comme élément de substitution dans la maille cristalline du minerai. Ils se substituent alors au niveau atomique à des éléments communs¹⁴⁵ dans la maille cristalline de minerais abondants comme les silicates. Il faut alors rompre chimiquement la totalité du minerai ce qui est coûteux en terme d'énergie et implique une rupture brutale dans la relation teneur-énergie.
- Les gisements à venir prendront probablement des formes beaucoup plus réfractaires, contiendront plus d'impuretés, seront plus profonds et nécessiteront un broyage plus fin (UNEP, 2013). Tous ces obstacles accentuent la relation inverse¹⁴⁶ existante entre l'énergie et épuisement des métaux.
- L'effet d'une dégradation de l'EROI moyen des énergies vertes via la mise en exploitation de gisements solaires et éoliens moins attractifs.

¹⁴³ Même le découplage relatif connaît un ralentissement conséquent depuis 20 ans.

¹⁴⁴ Si la croissance de la production représente la dérivée première de la production, la croissance de la vitesse de prélèvement constitue la dérivée seconde de la production.

¹⁴⁵ Par exemple, dans les roches communes, le plomb substitue à l'échelle atomique le potassium, et le zinc remplace le magnésium.

¹⁴⁶ Mesurée par le paramètre α dans l'équation (6-9).

- On ne considère pas ici les autres impacts environnementaux liés à l'épuisement des métaux (hausse des déchets, augmentation de la surface requise, besoin en eau, émission de gaz à effet de serre...). Ces externalités pourraient susciter des difficultés
- Notre analyse n'inclut pas non plus l'ensemble des besoins énergétiques des matériaux (métaux et non métaux) nécessaire au fonctionnement de l'infrastructure entourant le système énergétique isolé (stockage, transmission, distribution, utilisation).

A l'opposé, nous pouvons mobiliser des facteurs qui ralentiraient, voire qui stopperaient la causalité circulaire cumulative existante entre l'énergie et les métaux. Il existe potentiellement cinq leviers :

- Le recyclage peut ralentir l'épuisement et diminuer considérablement l'apport énergétique par tonne de métal (des économies énergétiques de l'ordre de 65 à 95% d'après Norgate et Haque (2010)).
- La dématérialisation consisterait principalement à diminuer l'apport en métaux par MW de système électrique installé.
- Une réduction de la consommation unitaire énergétique par métal sous l'effet de l'efficacité énergétique. Il existe d'ailleurs des viviers importants d'économies d'énergie avant d'atteindre les minimums thermodynamiques (UNEP, 2013 ; Norgate et Jahanshahi, 2010 ; 2011).
- Il existe encore des marges de progression sur les EROI établis sur les renouvelables, notamment grâce à une augmentation des rendements de conversion énergétique.
- La substitution technique de métaux géologiquement rares par des métaux communs (Skinner, 1976) ou d'autres matériaux (Goeller and Weinberg, 1978) pourrait constituer une bonne échappatoire au problème de l'épuisement.
- La coproduction est un bon moyen de réaliser des économies d'envergure notamment lorsqu'aucun des métaux ne peut assumer seul les coûts. On peut penser qu'au niveau de concentration de la croûte terrestre, la coproduction de dizaines de métaux sera généralisée.

Ces leviers ne peuvent cependant pas s'affranchir de limites économiques, techniques et physiques (principalement thermodynamiques).

5 Conclusion

L'apport des études de criticité sur les métaux représente une réelle avancée pour qualifier la compétitivité des secteurs et des pays et leur sensibilité vis-à-vis de ces ressources naturelles. Ces analyses apportent également un éclairage novateur sur les apports des métaux aux différents secteurs, une méthodologie plutôt réservée aux ressources énergétiques jusque là. Néanmoins, ce chapitre a pu montrer que ces études sont insuffisantes pour étudier l'épuisement des métaux et leur disponibilité de long terme. D'une part, parce que ces études comportent un certain nombre de limites impactant fortement les conclusions de leurs résultats. D'autre part, car le phénomène d'épuisement y est réduit à un aspect quantitatif alors que celui-ci se manifeste aussi par des modifications de la nature qualitative des métaux. Nous avons également pu voir que la transition énergétique agit à plusieurs niveaux (mix énergétique, technologique, intensité matérielle...), ce qui par conséquent, implique de nombreuses incertitudes sur les quantités et la nature des métaux demandés. Un exercice de prospective construit au niveau du secteur du transport décarboné, signale néanmoins que des croissances importantes des demandes en métaux rares pourraient émerger d'ici à 2050. Les quantités de métaux rares appelées restent tout de même relativement modérées (en comparaison du cuivre par exemple) compte tenu du faible degré d'épuisement quantitatif de ces métaux rares. Ce constat contraste avec les deux chapitres précédents où les métaux rares semblaient cumuler des caractéristiques contraignantes pour le développement de la transition énergétique.

La seconde partie de ce chapitre s'est appliquée à démontrer que le secteur énergétique et le secteur des métaux étaient imbriqués. Loin de se réduire, cette interdépendance a pris de l'essor depuis le début des années soixante-dix. Or, cette liaison très forte rend particulièrement plausible la survenue d'un cercle vicieux entre métaux et énergie si une dynamique de rétroaction positive prenait place. Les différents canaux de transmission de cette rétroaction positive ont été identifiés, il s'agit principalement d'une déconcentration de nos énergies (baisse de l'EROI), d'une intensité matérielle plus forte en métaux des nouvelles énergies et d'un épuisement des métaux réclamant de plus en plus d'énergie.

Cette causalité cumulative a ensuite fait l'objet d'une analyse approfondie et nos scénarios établis à horizon de très long terme ont montré (avec toutes les incertitudes qu'ils comportent)

que la stabilisation de celle-ci interviendrait à un niveau où nos énergies ne dégageraient plus suffisamment de surplus énergétique pour soutenir nos sociétés actuelles.

Les solutions apportées à ce type de problème peuvent prendre la forme de deux stratégies totalement différentes. Une première stratégie consisterait à favoriser des solutions technologiques parmi lesquelles on trouve les cinq leviers de rétroaction négative évoqués plus haut. C'est une stratégie confortable mais qui inclue des limites économiques, techniques et physiques. On comprendra que ces actions agissent non pas à la source mais sur les conséquences de l'activité humaine. Une seconde stratégie, beaucoup plus difficile à mettre en œuvre et aussi plus contestée, supposerait d'agir sur les causes et non pas sur les conséquences. L'origine de l'épuisement qualitatif de nos énergies et de nos métaux réside dans la croissance du périmètre de nos sociétés (économique et démographique), il pourrait donc s'agir de s'interroger sur la nécessité de celle-ci. Cette remise en cause du principe de croissance quantitative nécessite de questionner l'interprétation reliant productions matérielles marchandes à richesses, et richesses à bien être comme l'explique Pretty (2013). Enfin, une troisième voie, peut être plus efficace, allierait à la fois une modification des comportements, un changement d'objectifs, et des solutions technologiques.

Au final, cette seconde partie a été l'occasion de démontrer que les caractéristiques attachées aux métaux rares (la contrainte de sous-produit, l'absence de marché organisé et l'épuisement) peuvent apparaître comme contraignantes pour la mise en œuvre de la transition énergétique. Dans le chapitre 4, nous avons dégagé les principales conclusions liées à la nature de sous-produit des métaux rares. Cette spécificité implique que l'élasticité-prix de l'offre de ces métaux est très faible (voire nulle) en comparaison à d'autres produits primaires comme les métaux de base. La hausse de la demande des métaux rares sous l'effet de la transition énergétique sans hausse coordonnée et de même ampleur de la demande de leurs produits primaires, ne pourrait donc qu'entraîner une hausse de leurs prix. Cependant, nous avons aussi observé l'existence de marges de production pour les métaux rares, c'est-à-dire que la contrainte de sous-produit n'est pas totalement saturée et que nous pouvons encore augmenter la production des sous-produits (les métaux rares) sans avoir à faire progresser la production des produits primaires (les métaux de base).

Le chapitre 5, nous a permis quant à lui d'évoquer les causes et les conséquences reliées à l'absence de marché organisé pour les métaux rares. Notre modèle probabiliste logit expliquant la présence ou l'absence de marché à terme par le niveau de prix et la taille de la

production physique des métaux, montre que la probabilité qu'apparaisse un marché à terme pour la plupart des métaux rares est relativement faible. En ce qui concerne les conséquences liées à l'absence ou la présence de marché à terme, des tests économétriques convergent vers l'hypothèse d'une plus forte volatilité des prix en cas d'absence de marché à terme. Ces mêmes tests soutiennent aussi l'hypothèse de prix de marché (symptomatique des commodités échangées à grande échelle) guidant les prix reportés (prix établis sur des relations de gré à gré) et le renforcement des relations avec des métaux de base partageant les mêmes débouchés. Nous n'avons pas réussi toutefois à mettre en lumière le bon fonctionnement des marchés *futures* créés pour des micromarchés de métaux rares comme le cobalt et le molybdène.

Enfin, le chapitre 6 a souligné les limites des études actuelles de criticité pour proposer en complément de celles-ci une étude de l'impact de l'épuisement qualitatif des métaux sur le surplus énergétique généré par les systèmes d'énergie renouvelable. Nous avons démontré que le secteur de l'énergie et le secteur des métaux sont interdépendants et que ce lien a tendance à se renforcer au cours du temps. Les mécanismes sous-jacents à ce phénomène sont principalement l'épuisement qualitatif des énergies fossiles et renouvelables ainsi que celui des métaux. A un horizon de très long terme, nos calculs indiquent que le surplus énergétique généré par les énergies renouvelables serait alors insuffisant pour maintenir nos sociétés actuelles. Ce lien de rétroaction positive pourrait susciter une véritable interrogation sur la soutenabilité de la transition énergétique à long terme si aucune mesure n'était prise pour parer à l'épuisement des métaux nécessaires à nos systèmes énergétiques.

CONCLUSION GENERALE

« Anyone who believes that exponential growth can go forever in a finite world is either a madman or an economist ».

Kenneth E. Boulding, President de l'American Economic Association, 1968.

Au terme de ce travail, nous avons pu souligner, via une diversité d'analyses et, pour ne pas nous cantonner à une approche, comment les contraintes entourant l'usage des métaux rares étaient susceptibles d'enrayer la mise en œuvre de la transition énergétique.

L'un des points de départ a consisté à définir dans une première partie de thèse notre objet d'étude et les méthodes permettant d'analyser sa disponibilité à long terme.

Ainsi ce travail a tout d'abord été l'occasion de mieux saisir la véritable nature des métaux se cachant derrière le terme de « métaux rares ». Nous avons pu contribuer par le biais d'une analyse statistique approfondie à réduire l'imprécision existant autour de ces termes. Loin d'être un ensemble disparate de métaux regroupés uniquement par opposition à d'autres groupes bien précis, les métaux rares partagent en réalité de nombreux traits communs. Ainsi, nous trouvons parmi ces caractéristiques similaires : la présence d'une production en tant que sous-produit majoritaire, une forte concentration géographique de la production souvent doublée d'un risque géopolitique, un très faible recyclage généré par une absence d'incitations économiques et réglementaires, des micromarchés associés à une forte volatilité de la production et de la demande, une incertitude prégnante causée par une absence quasi-systématique de marchés à terme, et un manque éblouissant d'indicateurs sur l'épuisement de ces métaux.

Nous nous sommes ensuite penchés sur les théories ayant pour objet d'étude l'un des principaux déterminants de la disponibilité économique de long terme d'une ressource naturelle : son épuisement. Par ce biais, nous avons pu mettre en avant les filiations, les limites et les contradictions apparues entre les divers champs d'analyse (économique, géologique, biophysique...). Il n'existe toujours pas de théorie unifiée sur la problématique de l'épuisement et les conséquences qui en découlent. De la même manière, la position économique consistant à relayer l'hypothèse d'un scénario de croissance continue des limites

liées à l'épuisement apparaît comme de plus en plus isolée vis-à-vis des positions soutenues dans les autres disciplines (biologie, physique, géologie...). Une fois prise en compte les mécanismes économiques et technologiques accroissant les limites d'exploitation des ressources naturelles, il existe toujours une fin à l'exploitation des ressources naturelles épuisables. Néanmoins, il reste que les métaux rares ne disposent (pour la plupart) que d'une information limitée pour la construction d'indicateur signalant l'épuisement.

Cette absence de mesures traditionnelles d'épuisement pour ces métaux, nous a conduit à nous interroger sur la pertinence des indicateurs signalant l'épuisement d'une ressource non renouvelable. Toutefois, là encore, il apparaît après inventaire qu'aucun indicateur ne permet de décrire de façon satisfaisante, statiquement et dynamiquement, l'état d'épuisement d'une ressource. Les trajectoires globalement non monotones et la plupart du temps particulièrement chahutées et/ou sans rapport direct avec le niveau d'épuisement de la ressource nous ont poussé à explorer des indicateurs socio-environnementaux fondés, soit sur une théorie économique de la valeur, soit adaptés d'une théorie énergétique de la valeur. Les résultats théoriques et empiriques suggèrent que les prix des métaux rares sont largement sous-estimés, et qu'il en suit une surconsommation non optimale de la ressource dont l'ampleur dépend du degré d'élasticité de la demande, de l'importance des dégâts externes et des bénéfices non monétarisés tirés des services éco-systémiques. Cette surconsommation non optimale des métaux mineurs a pour principale conséquence d'épuiser trop rapidement les réserves associées à ces métaux.

La seconde partie de cette thèse a ensuite visé la réalisation d'une analyse portant sur trois caractéristiques des métaux rares pouvant enrayer la transition énergétique : la contrainte de sous-produit, l'absence de marché à terme et la contrainte d'épuisement.

Tout d'abord, les métaux rares, compte tenu de leur valeur économique et de leur degré de concentration dans les gisements, ne permettent pas une exploitation minière isolée rentable économiquement. Il faut par conséquent les extraire conjointement avec d'autres métaux. Ceci a d'importantes conséquences notamment en termes de flexibilité de l'offre vis-à-vis de modifications des prix impulsés par la demande. La théorie stipule qu'une des principales conséquences de cette production en sous-produit repose sur la réduction voire l'annulation de l'élasticité-prix de l'offre de ces métaux. Nous avons pu montrer avec un modèle statique très simple, que le degré d'élasticité de l'offre minière par rapport au prix du sous-produit dépend du ratio entre son rapport de concentration avec le produit primaire et le rapport de son prix

avec ce dernier. Dans le cas d'un rapport très faible, le producteur minier détermine les variations de la production jointe uniquement par rapport à la demande du produit primaire et pas du tout par rapport à la demande du sous-produit. Cela se traduit par une élasticité prix nulle de l'offre minière par rapport au sous-produit. Pourtant, il existe néanmoins dans la réalité, un ensemble de circonstances qui explique que l'offre de sous-produit garde une certaine flexibilité par rapport à sa demande (marge potentielle). Néanmoins, nous rappelons malgré tout, que dans une situation où la demande adressée aux métaux rares progresserait plus rapidement que la demande de métaux de base (majoritairement extrait en tant que produit primaire), il risquerait de survenir une saturation de l'offre potentielle de ces sous-produits. Ce type d'événement entraînerait avec lui une pénurie des métaux rares sans fortes réactions de l'offre. Toutefois, ce scénario apparaît relativement peu probable sous des hypothèses moyennes lorsqu'il est appliqué à la situation du secteur photovoltaïque.

Ensuite, nous nous sommes attaché à disséquer l'ensemble des causes et des conséquences reliées à l'absence de marché à terme pour les métaux rares. Il existe un certain nombre de raisons qui étayaient la présence de marché à termes : une incertitude importante affectant le marché sous-jacent, une forte corrélation des prix entre les différents types de qualités et de localisation de la commodité, un nombre élevé de participants, une faible intégration verticale, une valeur totale du produit vendu élevée donc risquée et une absence de régulation. Or, force est de constater que les métaux rares ne remplissent pas la plupart de ces critères. Pour évaluer la possibilité de création de marchés à terme pour ces métaux, nous avons mis à jour, par le biais d'un modèle logit, l'existence d'une très bonne relation entre deux variables proxy (le prix et la production du métal) et la probabilité d'apparition d'un marché à terme. Compte tenu des positions des métaux rares dans ce modèle, nous en déduisons qu'il est très improbable pour la plupart d'entre eux qu'ils détiennent un jour des marchés à terme. Dès lors, il convient ensuite de se pencher sur les conséquences découlant de cette absence de marché à terme. La théorie économique ne parvient pas sur ce point à trancher sur la possibilité d'une trajectoire de sous-consommation ou de surconsommation, bien que les chercheurs s'accordent à dire qu'une telle situation est source d'inefficience et de non optimalité. Par ailleurs, nous avons saisi l'opportunité fournie par la récente cotation au LME de deux métaux rares (le cobalt et le molybdène) pour étudier les modifications de comportement de leurs prix. Nous observons par ce biais, un renforcement de leur relation avec les métaux majeurs aux débouchés proches. Les prix de marché du LME semblent désormais guider les prix reportés, même si les marchés *futures* n'apparaissent pas comme

fonctionnant correctement pour l'instant. Nous démontrons aussi que les métaux sans *futures* offrent des niveaux de volatilité de prix plus élevés que les métaux avec *futures*.

Enfin, nous avons entrepris d'analyser la contrainte d'épuisement des métaux dans le contexte de la transition énergétique. La multitude d'études de criticité construites sur ce sujet a le mérite d'attirer davantage les projecteurs sur la sphère des métaux mais elles comportent plusieurs limites pour appréhender correctement l'épuisement des métaux (géographique, temporelle, sectorielle, épuisement quantitatif). C'est pourquoi, à titre de comparaison et pour dépasser les limites de ces études, un scénario prospectif a été réalisé sur les besoins en lithium et en cobalt¹⁴⁷ dans le cadre de la transition énergétique. Il apparaît que l'accomplissement de ce scénario exigera d'importants efforts en termes d'exploration et d'investissement car les quantités nécessaires pour soutenir le R/P à un niveau acceptable atteignent des grandeurs élevées en comparaison de celles aujourd'hui. Toutefois, l'examen de la production cumulée passée de ces métaux et des quantités de ressources en place, relativement à des métaux très exploités comme le cuivre, nous laisse penser que l'épuisement et le tarissement physique des quantités associés aux métaux rares reste une considération de second ordre. Nous percevons également l'épuisement des métaux (quantités et nature) causé par le secteur énergétique comme le résultat de quatre facteurs principaux : le niveau de la demande en énergie, le mix énergétique, le mix technologique, et l'intensité matérielle par technologie. Quelque soit la nature des métaux utilisés dans les NTE et les solutions de substitutions envisagées, des modifications vertueuses au premier abord se concrétisent souvent par des reports d'impact sur d'autres secteurs (eau, sols, métaux...). A ce titre, la transition énergétique apparaîtrait aujourd'hui comme plutôt antinomique au développement durable (objectifs sociaux, économiques et environnementaux) si l'on prend en compte son impact au niveau global et non pas au simple niveau sectoriel de l'énergie. De même, pris séparément, le secteur de l'énergie semble dégager un surplus énergétique toujours plus faible et incorpore un contenu en métaux toujours plus élevé tandis que le secteur des métaux consomme toujours plus d'énergie sous l'effet d'un épuisement essentiellement qualitatif. En prolongeant les tendances de ce cercle vicieux, les technologies vertes actuelles ne dégageraient plus aucun surplus énergétique lorsque les métaux nécessaires à leur construction verraient leurs teneurs abaissées à la moyenne de la croûte terrestre ; nous amenant à nous interroger sur la réussite de la transition énergétique à long terme dans les conditions actuelles. Il existe cependant plusieurs possibilités (recyclage, substitution,

¹⁴⁷ Ces métaux sont souvent évoqués lorsque le déploiement des énergies bas-carbone est étudié.

coproduction...) d'échapper à ce cercle vicieux même si elles comportent d'assez grandes incertitudes.

Ces derniers travaux renforcent l'intérêt d'une science économique en échange permanent avec d'autres sciences pour mieux expliquer la réalité. Ils encouragent aussi la recherche et l'identification de problématiques intersectorielles visibles à une échelle plus large. Ils dénotent également les effets de reports potentiellement plus nombreux qu'engendrerait une société plus complexe (Bihouix, 2014). Ce point accentue d'ailleurs la crédibilité de la thèse de Tainter (2013) décrivant nos sociétés comme un processus de complexification continue dont les bénéfices marginaux sont croissants puis décroissants. Lorsque le coût marginal de la complexification dépasserait les bénéfices marginaux, il en suivrait un cercle vicieux dont la fin ultime est un effondrement de la société.

Ces travaux de thèse pourront faire l'objet de prolongements ultérieurs afin d'apporter des éléments de raffinement et des éclairages supplémentaires. Pour commencer, nous pouvons imaginer que notre classification élaborée dans le chapitre 1 pourrait bénéficier d'approfondissements prenant en compte le temps et la dynamique des métaux. Celle-ci gagnerait aussi à être réalisée à une échelle plus large pour incorporer et situer les métaux dans l'ensemble plus vaste des ressources naturelles. Par ailleurs, l'application de la méthode d'évaluation contingente sur l'ensemble des services éco-systémiques entourant une installation dédiée aux métaux mineurs en parallèle à la prise en compte élargie des effets externes liés à celle-ci, pourrait considérablement préciser le niveau de surconsommation en métaux mineurs de nos sociétés. La théorie constituée autour de la contrainte de sous-produit pourrait aussi profiter d'une application à un autre secteur que le photovoltaïque (éolien, CCS, raffinage pétrolier, transports électriques...). Il paraît aussi essentiel de considérer dans des travaux futurs, l'importance des métaux dans les différentes formes d'énergies fossiles non conventionnelles décarbonées, dans la mesure où celles-ci restent encore parfois perçues comme une alternative économique souvent plus intéressante que les énergies renouvelables. Par ailleurs, notre compréhension pourrait considérablement gagner d'une approche hybride consistant à coupler les effets de phénomènes d'épuisement physique vue sous l'angle de l'énergie (comme décrits dans le chapitre 6) avec des mécanismes de rareté (recyclage, efficacité, substitution) pris en compte dans une approche purement monétaire. Un certain nombre d'autres spécificités propres aux métaux rares, comme l'absence de recyclage, et les tensions géopolitiques pourraient aussi être développées. Enfin, la demande - en particulier les problématiques organisées autour de l'intensité matérielle - bien que prise en compte n'a été

que très peu explorée dans cette thèse contrairement au versant offre. Celle-ci détermine pourtant la disponibilité économique de long terme des ressources naturelles notamment via sa relation complexe avec le progrès technique. Il y a donc là des recherches potentiellement très fructueuses et éclairantes à engager.

Compte tenu des éclairages apportés par cette thèse, nous sommes en mesure de mettre en exergue les principaux risques entraînés par une consommation accrue de métaux rares. En résumant brièvement, l'usage généralisé des métaux rares dans les nouvelles technologies de l'énergie expose les énergéticiens :

- à une hausse importante de la volatilité du prix de leurs approvisionnements en matières premières sans possibilité de couverture directe par le marché.
- à un rationnement quantitatif de leurs approvisionnements en métaux rares en cas de saturation de la contrainte de sous-produit, sans forte réaction de l'offre suite à la hausse de leurs prix.
- à un possible emballement de la consommation énergétique des métaux rares (pour leur extraction et leur concentration) sous l'effet de l'épuisement, réduisant par ce biais considérablement le surplus énergétique dégagé par le système énergétique.

Par conséquent, les constats effectués par l'intermédiaire de cette thèse appellent plusieurs types de recommandations :

Il faut encourager en premier lieu l'économie du recyclage. Aujourd'hui, le recyclage des métaux rares est quasi-inexistant, faute d'incitation économique et d'un ensemble de contraintes techniques complexifiant considérablement la récupération. Nous pouvons alléger ces contraintes en généralisant l'éco-conception quand cela est possible et en subventionnant la politique de recyclage. L'appui d'une activité de recherche et développement dans ce domaine peut également profiter à faire émerger la rentabilité économique d'un ensemble de stériles miniers incorporant des métaux rares et souvent présents dans les pays de l'OCDE. Cela permettrait à la fois une diminution du recours aux mines et aux importations des pays dont l'approvisionnement comporte des risques. Néanmoins, l'impact du recyclage demeure considérablement amoindri dans une économie de croissance (cf. Annexes 2.2), c'est pourquoi il ne peut pas rester le seul levier d'action.

La substitution semble aussi un axe d'action particulièrement central. Evidemment, les agents économiques mobilisent déjà ces possibilités de substitution notamment lorsque certains

métaux rares ont déjà subis des ruptures d'approvisionnement et/ou des hausses de prix. Pourtant, nous pouvons penser que ces possibilités de substitution ne sont pas développées au maximum du fait d'anticipations souvent court-termistes. Dès lors, il existe la possibilité d'un risque majeur - apparaissant seulement à long terme - non intégré par les agents économiques mais dont la survenue pourrait être rapide et brutale. Il semble que les préconisations avancées par Skinner dans les années 70, à savoir la substitution des métaux géo-chimiquement rares par des métaux communs pourraient constituer une échappatoire plutôt efficace, là où c'est techniquement possible. La solution de Daly (remplacer une ressource non renouvelable par un substitut renouvelable) paraît quant à elle difficile à mettre en œuvre compte tenu du dépassement actuel de la bio-capacité de la planète et du rapport épuisable/renouvelable totalement déséquilibré de notre bilan. Enfin la règle d'Hartwick (investir la rente d'une ressource épuisable dans un capital de substitution) s'apparente à une logique vertueuse mais purement intellectuelle, car il n'existe pour l'instant aucun capital qui ne consomme pas de ressources naturelles et puisse remplacer l'ensemble des ces dernières.

L'efficacité (énergétique et matérielle) ne doit pas être négligée même si son impact n'a pas été suffisant dans l'histoire pour contrebalancer totalement les besoins de la croissance démographique et économique.

La sobriété peut également être ajoutée à notre palette d'action même si elle ne dépend pas uniquement de la technologie mais bien d'une modification des comportements. Or, il est légitime de penser que cette sobriété, si elle était employée à grande échelle et sous les conditions du système actuel, entrerait en contradiction avec la logique de croissance économique en réduisant la consommation. Il convient, par conséquent, de questionner la logique de croissance elle-même présente en filigrane dans cette thèse comme la cause principale de l'épuisement des ressources naturelles. Depuis un certain temps déjà un ensemble d'économistes (rapport Stiglitz et al, 2009) se sont accordés pour admettre que le PIB ne reflète pas correctement la richesse d'une nation (c'est une mesure de flux et non pas de stock). Ce travail a conduit à recommander l'usage d'indicateurs verts en sus de l'indicateur traditionnel du PIB. Il paraît en effet inconcevable de gérer la pénurie d'essence d'une voiture à l'aide du seul compteur de vitesse sauf à s'exposer à des difficultés inattendues et imprévisibles. Cette approche consistant à doubler le PIB d'autres indicateurs dans des comptes « satellites » suscite pourtant un scepticisme scientifique important. D'une part, il se pose le choix de l'indice pertinent si les indicateurs suivent des chemins contradictoires, ce qui nous ramène à une hiérarchisation des choix pour l'action. D'autre

part, le verdissement de l'économie via la substitution de capital naturel par du capital physique et humain pour faire progresser l'épargne nette ajustée entraîne avec lui un paradoxe : la progression de cet indicateur « vert » se traduirait par la hausse du capital humain et physique pour combler la réduction de l'apport de la nature. Il persiste donc ici un problème de substitution dans la mesure où le capital humain et le capital physique (ou immatériel) consomment indirectement du capital naturel. D'autres économistes sont allés plus loin encore en remettant en cause l'intérêt de la croissance dans l'accroissement du bien être (voir Pretty, 2013). Dans la même veine, Piketty (2013) a montré que le capitalisme de la deuxième moitié du XX siècle a entraîné une formidable remontée des inégalités¹⁴⁸ en totale opposition au capitalisme réducteur d'inégalité par ruissellement dépeint par Kuznet. On est donc ici dans une vision rigoureusement inverse à l'image d'une croissance économique générant elle-même les solutions à ces problèmes. Le débat axé sur l'épuisement des ressources naturelles est donc peut être naturellement appelé dans le futur à se repositionner sur les problématiques relatives à la croissance (démographique et économique). Ceci requiert à la fois de questionner la pérennité de la croissance (quel niveau à long terme) et son intérêt pour la société et le bien être des individus qui la composent. Des réponses sociétales auxquelles l'économiste, seul, ne pourra pas répondre.

¹⁴⁸ Notamment par un accaparement de la richesse par le centile supérieur. Les mécanismes du capitalisme accroissent fortement les inégalités lorsque le taux de rendement du capital dépasse durablement le taux de croissance de l'économie. Or, Gordon (2012) s'interroge sur l'abaissement de la croissance économique de long terme à des seuils faibles (0,5-1%) d'ici la fin du XXIème siècle, ce qui ne manquerait pas d'accroître encore les inégalités.

BIBLIOGRAPHIE

ADEME, Monier, V., Escalon, V., Cassowitz, L., Massari, F., Deprouw, A., (2010). *Etude du potentiel de recyclage de certains métaux rares*, Partie 1, rapport réalisé par BIO Intelligence Service, juillet 2010.

Ahrens, A. W., Sharma, V. R., (1997). Trends in Natural Resource Commodity Prices: Deterministic or Stochastic?, *Journal of Environmental Economics and Management*, 33, 59-74.

Ahrens, L. H., (1954). The lognormal distribution of the elements: I. A fundamental law in geochemistry and its subsidiary, *Geochimica Cosmochimica Acta*, 5, 49-93.

Alfantazi, A.M., Moskalyk, R.R., (2003). Processing of indium: a review, *Minerals Engineering*, 16, 687–694.

Altenpohl, D. G., (1980). *Materials in World Perspective*, Springer-Verlag: Berlin, 220p.

Anderson, J. D., Hudson, D., Harri, A., Turner, S., (2007). *A New Taxonomy of Thin Markets*, Paper presented at the Southern Agricultural Economics Association, Annual Meeting, Mobile, AL, February 4-7, 2007.

Andersson, B. A., (2000). Materials availability for large-scale thin-film photovoltaics, *Progress in Photovoltaics Research and Application*, 8, 61-76.

Andersson, B. A., Rade, I., (2001). Metal resource constraints for electric-vehicle batteries, *Transportation Research Part D*, Transport and Environment, Volume 6.

Angerer G., (2009). Raw materials for emerging technologies: The case of Lithium, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISIKarlsruhe, Seminar on Raw materials –A scarce resource in a sustainable world, Germany.

Antoniou, A., Foster, A. J., (1992). The Effect of Futures Trading on Spot Price Volatility: Evidence for Brent Crude Oil Using Garch, *Journal of Business Finance & Accounting*, 19, 4, 473-484.

Arnim Von Gleich, (2006). Outlines of a Sustainable Metals Industry, in: *Securing our Future -Steps Towards a Closed Loop Economy*, Springer, 607p.

Arrow, K. J., Chang, S., (1982). Optimal pricing, use, and exploration of uncertain natural resource stocks, *Journal of Environmental Economics and Management*, 9, 1, 1-10.

Ashby, M. F., (2013). *Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice*, Edition Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2^{ème} édition, 628p.

Assemblée Nationale, Bouillon, C., Havard, M., (2011). *Rapport d'information N°3880 sur la gestion durable des matières premières minérales*, Commission du développement durable et de l'aménagement du territoire, 26 octobre 2011, 164p.

Aulton, A. J., Ennew, C. T., Rayner, A. J., (1997). Efficiency Tests of Futures Markets for UK Agricultural Commodities, *Journal of Agricultural Economics*, 48, 3, 408-424.

- Ayres R. U., Ayres, L. W., Råde, I., (2002). *The life cycle of copper, its co-products and byproducts*, Report, 210p.
- Ayres, R. U., (1999). Materials, economics and the environment, in: Van den Bergh, 1999, *Handbook of Environmental and Resource Economics*, Edward Elgar Publishing, pp. 867-894, 1300p.
- Ayres, R. U., (2001). Resources, Scarcity, Growth and the environment, *Working paper*, INSEAD.
- Ayres, R. U., (2007). On the practical limits to substitution, *Ecological Economics*, 61, 115-126.
- Bairoch, P., (1997). *Victoires et déboires*, Gallimard, Folio Histoire, No. 78, 662p.
- Baldi, L., Peri, M., Vandone, D., (2011). Spot and Futures Prices of Agricultural Commodities: Fundamentals and Speculation, *Working Paper*, No. 2011-3, Department of Economics, Management and Quantitative Methods at Università degli Studi di Milano.
- Barbier, E. B., (2011). *Scarcity and Frontiers: How Economies Have Developed Through Natural Resource Exploitation*, Cambridge University Press, 768p.
- Barnett, H. J., (1979). Scarcity and Growth Revisited, in: Smith, V K, *Scarcity and Growth Reconsidered*, Resources For the Future, Johns Hopkins University Press, Baltimore and London, pp. 163-217.
- Barnett, H., Morse, C. (1963). *Scarcity and Growth: The Economics of Natural Resource Availability*, Baltimore: Johns Hopkins University Press for Resources For the Future, 288p.
- Baumol, W. J, (1977). On the Proper Cost Tests for Natural Monopoly in a Multiproduct Industry, *The American Economic Review*, 67, 5, 809-822.
- Beckerman, W., (1995a). Small is Stupid: Blowing the Whistle on the Greens, Gerald Duckworth & Co Ltd, First Edition, 210p.
- Beckerman, W., (1995b). *Growth, the Environment and the Distribution of Incomes: Essays by a Sceptical Optimist*, Edward Elgar Pub, 472p.
- Beckerman, W., (1998). The Ultimate Resource 2 by Julian L. Simon. Review by: Wilfried Beckerman, *The Economic Journal*, 108, 446, 228-230.
- Berck, P., Roberts, M., (1996). Natural Resource Prices: Will They Ever Turn Up?, *Journal of Environmental Economics and Management*, 31, 65-78.
- Bihouix, P., (2013). Matérialité du productivisme, in : Sinäi, A., *Penser la décroissance : Politiques de l'Anthropocène*, Paris : Presses de Sciences Po, 224p.
- Bihouix, P., (2014). *L'âge des low-tech*, Editions du Seuil, 336p.
- Bihouix, P., De Guillebon, B., (2010). *Quels futurs pour les métaux ? Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société*, édition EDP sciences, 300p.
- Bleiwas, D. I., (2010). *Byproduct Mineral Commodities Used for the Production of Photovoltaic Cells*, U.S. Geological Survey Circular 1365, 10 p.

- Bontems, P., Rotillon, G., (2007). *Economie de l'environnement*, Edition La découverte, Collection Repères, 119p.
- Boulding, K. E. (1966). *The economics of the coming spaceship earth*, in *Environmental Quality in a Growing Economy*, edition Henry Jarett, The John Hopkins Press for Resources for the Future, Washington, D.C.
- Boulding, K. E., (1992). *Towards a New Economics: Critical Essays on Ecology, Distribution, and Other Themes*, Edward Elgar Pub, 368p.
- BRGM, (2010). *Panorama 2010*, rapport public sur le marché du molybdène, niobium, germanium, gallium, rhénium, béryllium, sélénium, tellure, et terres rares. Monographie individuelle.
- BRGM, (2011). *Panorama 2011*, rapport public sur le marché du lithium, tungstène, antimoine, tantale. Monographie individuelle.
- Brobst, D. A., (1979). Fundamental Concepts For the Analysis of Resource Availability, In: Smith, V K, *Scarcity and Growth Reconsidered*, Resources for the Future, Johns Hopkins University Press, Baltimore and London, pp. 106-142.
- Brooks, D. B., (1965). *Supply and competition in minors metals*, Johns Hopkins Press for Resources For Future, Baltimore, 150p.
- Brorsen, B. W., Fofana, N. F., (2001). Success and Failure of Agricultural Futures Contracts, *Journal of Agribusiness*, 19, 2, 129-145.
- Brown, G. M., Field, J. B. C., (1978). Implications of Alternative Measures of Natural Resource Scarcity, *Journal of Political Economy*, 86, 2, 229-243.
- Brown, G. M., Field, J. B. C., (1979). The Adequacy of Measure for Signaling The Scarcity of Natural Resources, in: Smith, V K, *Scarcity and Growth Reconsidered*, John Hopkins University Press, Baltimore MD, pp. 218-248.
- Brown, P. A., Wolk, D., (2000). Natural Resource Scarcity and Technological Change, *Economic and Financial Review*, first quarter, Federal Bank of Dallas, 2-13.
- Cairns, R. D., (1990). Les ressources non renouvelables : le côté offre, *L'Actualité économique*, 66, 4, 444-460.
- Cairns, R. D., (1990). A Contribution to the Theory of Depletable Resource Scarcity and its Measures, *Economic Inquiry*, 28, 744-755.
- Campbell, G. A., (1985). The role of co-products in stabilizing the metal mining industry, *Resources Policy*, 11, 4, 267-274.
- Candelise, C., Spiers, J., Gross, R., (2011). Materials availability for thin film (TF) PV technologies development: a real concern?, *ICEPT working paper*, Ref: ICEPT/WP/2011/001, February 2011.
- Carey, H. C., (1840). *Principles of Political Economy*, (1967), Kelley, New York.
- Carlton, D. W., (1984). Futures Markets: Their Purpose, Their History, Their Growth, Their Successes and Failures, *The Journal of Futures Markets*, 4, 3, 237-271.

- Carmichael, R.S., (1989). *CRC Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals*, CRC Press, Boca Raton.
- Cassel, G., (1923). *The Theory of Social Economy*, traduit par J. McCabe, Fisher Unwin, London.
- Christmann, P., (2012). *Les métaux rares : enjeux sociétaux et géopolitiques*, conférence des amis du Visiatome, Marcoule, 13 septembre.
- Cleveland, C. J., (1987). Biophysical Economics: Historical Perspective and current research trends, *Ecological modelling*, 38, 47-73.
- Cleveland, C. J., (1991a). Natural Resource Scarcity and Economic Growth Revisited: Economic and Biophysical Perspectives, In: *Ecological Economics the Science of management of Sustainability*, Costanza, Colombia University press, New York, p. 289-319.
- Cleveland, C. J., (1991b). Physical and Economic Aspects of Resource Quality. The Cost of Oil Supply in the Lower 48 United States, 1936-1988, *Resources and Energy*, 13, 163-188.
- Cleveland, C. J., (1992). Energy Quality and Energy Surplus in the Extraction of Fossil Fuels in the U.S., *Ecological Economics*, 6, 139-162.
- Cleveland, C. J., (1993). An exploration of alternative measures of natural scarcity: the case of petroleum resources in the US, *Ecological Economics*, 7, 123-157.
- Cleveland, C. J., (2005). Net energy from oil and gas extraction in the United States, 1954-1997, *Energy*, 30, 769-782.
- Cleveland, C. J., Costanza, R., Hall, C. A. S., Kaufmann, R. K., (1984). Energy and the U.S Economy: A Biophysical Perspective, *Science*, 225, 4665, 890-897.
- Cleveland, C. J., Ruth, M., (1997). When, Where, and by how much do biophysical limits constrain the economic process? A survey of Nicholas Georgescu-Roegen's contribution to ecological economics, *Ecological Economics*, 22, 203-223.
- Cleveland, C. J., Stern, D. I., (1999). Indicator of Natural Resource Scarcity: a Review and Synthesis, in: Van der Bergh, *Handbook of Environmental and Resource Economics*, pp. 89-108, Edward Elgar Publishing, 1300p.
- Cleveland, C. J., Stern, D. I., (2001). Natural Resource Scarcity Indicators: an Ecological Economic synthesis, In: *The Economics of Nature and The Nature of Economics*, Cleveland C.J., Stern D.I., Costanza R., Edward Elgar Publishing, pp. 238-261.
- Cleveland, C.J., Kaufman, R. K., (1991). Forecasting Ultimate Oil Recovery and Its Rate of Production: Incorporating Economic Forces into the Models of M. King Hubbert, *The Energy Journal*, 12, 2, 17-46.
- Cobalt development Institute, (2011). *Cobalt Supply and Demand 2011*, Cobalt Facts, 6p.
- Cohen, D., (2009). *La prospérité du vice. Une introduction (inquiète) à l'économie*, Edition Albin Michel, 320p.
- Commissariat général à la stratégie et à la prospective, (2013). *Approvisionnement en métaux critiques : un enjeu pour la compétitivité des industries française et européenne ?*, 07/2013, No. 3, 16p.

- Commission Economique des Nations Unies pour l'Europe, (2007). *Ce que la CEE-ONU fait pour vous : vos ressources énergétiques*, 3p.
- Common, M., (1997). Is Georgescu Roegen versus Solow/Stiglitz the important point?, *Ecological Economics*, 22, 277-279.
- Commons, J.R, (1934). *Institutional Economics*, New York, Macmillan.
- Cordell, D. Drangert, J.-O., White, S., (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought, *Global Environmental Change*, 19, 292-305.
- Costanza, R., Daly, H. E., (1992). Natural Capital and Sustainable Development, *Conservation Biology*, 6, 1, 37-46.
- Cox, C. C., (1976). Futures Trading and Market Information, *Journal of Political Economy*, 84, 6, 1215-1237.
- Craig, J. R., Vaughan, D. J., Skinner, B. J., (2001). *Resources of the earth: origin, use, and environmental impact*, Prentice Hall, Pearson Education, 3ième edition, 520p.
- Crowson, P., (2012). Some observations on copper yields and ore grades, *Resources Policy*, 37, 1, 59-72.
- Cuddington, J. T., (2010). Long Term Trends in the Real Real Prices of Primary Commodities: Inflation Bias and the Prebisch-Singer Hypothesis, *Resources Policy*, 35, 72-76.
- Dale, M., (2010). Global Energy Modelling: A biophysical approach (GEMBA). A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering in the University of Canterbury by Michael Anthony Joseph Dale University of Canterbury, 2010.
- Dale, M., Krumdieck, S., Bodger, P., (2011). Net energy yields from production of conventional oil, *Energy Policy*, 39, 7095-7102.
- Daly, H. E., (1979). Entropy, Growth, and the Political Economy of Scarcity, In: Smith, V K, *Scarcity and Growth Reconsidered*, Resources for Future, Johns Hopkins University Press, Baltimore and London, pp. 67-94.
- Daly, H. E., (1985). The circular flow of exchange value and the linear throughput of matter-energy: a case of misplaced concreteness, *Reviews of Social Economy*, 279-297.
- Daly, H. E., (1990). Toward some operational principles of sustainable development, *Ecological Economics*, 2, 1, 1-6.
- Daly, H. E., (1995a). On Nicholas Georgescu-Roegen's contributions to Economics: an obituary essay, *Ecological Economics*, 13, 149-154.
- Daly, H. E., (1995b). Small is Stupid: Blowing the Whistle on the Greens by Wilfred Beckerman. Review by: Herman E. Daly, *Population and Development Review*, 21, 3, 665-675.
- Daly, H. E., (1997a). Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz, *Ecological Economics*, 22, 61-266.

- Daly, H. E., (1997b). Forum Reply to Solow/Stiglitz, *Ecological Economics*, 22, 271-273.
- Dasgupta, P. S., (2005). Sustainable economic development in the world today's poor, In: *Scarcity and Growth Revisited, Natural Resources and the Environment in the New Millennium*, Simpson Toman Ayres Editor, Resources For the Future, pp. 267-282.
- Dasgupta, P. S., Heal, G. M., (1974). The optimal depletion of exhaustible resources, *Review of Economic Studies*, Symposium on the economics of exhaustible resources, 3-28.
- Dasgupta, P.S., Heal, G.M. (1979). *Economic Theory and Exhaustible Resources*, Cambridge University Press, Cambridge, England.
- Deffeyes, K. S., (2005). *Beyond oil, The view from Hubbert Peak*, Hill and Wang Publisher, First Edition edition (2005).
- Deffeyes, K. S., MacGregor, I., (1980). World Uranium resources, *Scientific American*, 242, 1, 66-76.
- Department of Commerce, (1928). *Summarized Data of Copper Production*, Bureau of Mines: Economic Paper I, Common Metal Division, Economic Branch, Julhin, C. E., 40p.
- Department Of Energy, (2011). *Critical material strategy*, Rapport du DOE, USA, décembre 2011, 196p.
- Devarajan, S., Fisher, A. C., (1982a). Measures of Natural Resource Scarcity under uncertainty, In: Smith, V K, Krutilla, J V, *Exploration in natural resource economics*, Resources For Future, 1982, pp. 327-346, 356p.
- Deverajan, S., Fisher, A. C., (1981). Hotelling's Economics of exhaustible resources: Fifty years later. , *Journal of Economic Literature*, 19, 1, 65-73.
- Deverajan, S., Fisher, A. C., (1982b). Exploration and scarcity, *Journal of Political Economy*, 90, 6, 1279-1290.
- Diamond J., (2000). *Le troisième chimpanzé: Essai sur l'évolution et l'avenir de l'animal humain*, Edition Folio, Collection Folio Essais, 704p.
- Diamond J., (2006). *Effondrement. Comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie*, Edition Gallimard, Collection Folio essais, 873p.
- Diederer, A., (2010). *Global resource depletion, managed austerity and the elements of hope*, Eburon, 116p.
- EDF R&D, (2011). *Analyse du risque de rupture d'approvisionnement de matériaux utilisés dans le cycle du combustible*. Rapport interne. 420p.
- Ehrlich, P., (1968). *The Population bomb*, traduction française : La bombe "P" 7 milliards d'homme en l'an 2000, (1971), Editions J'ai lu, Les amis de la terre, 320 p.
- Ehrlich, P., Ehrlich, A. H., (2009). The population Bomb revisited, *The Electronic Journal of Sustainable Development*, 1, 3, 63-71.
- Ehrlich, P., Holdren, J. P., (1971). Impact of Population Growth, *Science*, 171, 3977, 1212-1217.

- El Serafy, (1991). The Environment as Capital, in: *Ecological Economics: The Science and Management of Sustainability*, Costenza R., pp. 168-175.
- Elshkaki, A., Graedel, T. E., (2013). Dynamic analysis of the global metals flows and stocks in electricity generation technologies, *Journal of Cleaner Production*, 59, 260-273.
- Engle, R. F., Granger, C. W. J., (1987). Co-integration and Error Correction: Representation, Estimation, and Testing, *Econometrica*, 55, 2, 251-76.
- Engle, R. F., Yoo, B. S., (1987). Forecasting and testing in co-integrated systems, *Journal of Econometrics*, 35, 143-159.
- Environmental Law Alliance Worldwilde, (2010). Guide pour l'évaluation des EIE de projets miniers, 118p.
- EPIA, (2011). Solar Generation 6, Solar photovoltaic electricity empowering the world 2011, 100p.
- Erickson, R. L., (1973). Crustal Abundance of Elements, and Mineral Reserves and Resource: *USGS Geological Survey Professional Paper 820*, p. 21-25.
- Escofier, B., Pagès, J., (2008). *Analyses factorielles simples et multiples, Objectifs, méthodes et interprétation*, collection sciences sup., édition Dunod 2008, 4^{ième} édition, 328p.
- European Commission, (2010). *Critical raw materials for the EU*, Rapport de la Commission Européenne, 84p.
- European Commission, (2013). Antitrust: Commission confirms unannounced inspections in oil and biofuels sectors, MEMO/13/435, disponible le 07/07/2014 à l'adresse suivante : http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-13-435_en.htm.
- Evans, M., Lewis, A. C., (2005). Dynamic metals demand model, *Resources Policy*, 30, 55-69.
- Fagnart, J-F, Germain, M., (2012). Les limites environnementales à la croissance en macroéconomie, *Reflets et perspectives de la vie économique*, 4, Tome LI, 25-46.
- Farrell, M. J., (2009). Carbon Emissions from Base Metal Mine Sites, *Mining Engineering*, 61, 4, 28-32.
- Farzin, Y. H., (1984). The effect of the discount rate on depletion of exhaustible resources, *Journal of Political Economy*, 92, 5, 841-851.
- Farzin, Y. H., (1992). The Time Path of Scarcity Rent in the Theory of Exhaustible Resources, *The Economic Journal*, 102, 413, 813-830.
- Farzin, Y. H., (1995). Technological Change and the Dynamics of Resource Scarcity Measures, *Journal of Environmental Economics and Management*, 29, 105-120.
- Faucheux S. et Noël J.F., (1995). *Economie des ressources naturelles et de l'environnement*, Collection U, Armand Colin Editeur, 370 p.
- Favennec, J-P., (2009). *Géopolitique de l'énergie : Besoins, ressources, échanges mondiaux*, Editions Technip, Collection IFP Publications, 296p.

- Field, A. (2000). *Discovering Statistics using SPSS for Windows*. London – Thousand Oaks – New Delhi: Sage publications Ltd, 512p.
- Fisher, A. C., (1977). On measures on natural resource scarcity, International Institute for Applied Systems Analysis, *RR-77-19*, August 1977.
- Fisher, A. C., (1978). Discovery Technical Change and Measure of Resource Scarcity, in: *Explorations in Natural Resource Economics*, V. Kerry Smith and John V. Krutilla, edition Baltimore: Johns Hopkins university press, 1982.
- Fisher, A. C., (1979). Measures of Natural Resource Scarcity, in: Smith, VK, *Scarcity and growth Reconsidered*, Johns Hopkins University Press, Baltimore MD, pp. 249-275.
- Fisher, A. C., Krutilla, J. V., (1975). Resource conservation, environmental preservation, and the rate of discount, *The Quarterly Journal of Economics*, 89, 3, 358-370.
- Fisher, A. C., Ward, M., (2000). Trends in Natural Resource Economics in JEEM 1974-1997: Breakpoint and Nonparametric Analysis, *Journal of environmental economics and management*, 39, 264-281.
- Fizaine, F., 2013. Byproduct production of minor metals: threat or opportunity for the development of clean technologies? The PV sector as an illustration, *Resources Policy*, 38, 3, 373-383.
- Fizaine, F., Dufour, N., (A paraitre). Erreur d'interprétation et erreur de prévision en économie de l'énergie et de la finance, in : Dufour, N. et Teneau, G., *Erreur de représentation en économie-gestion*, Edition l'Harmattan, Collection Perspectives organisationnelles.
- Fthenakis, V., (2009). Sustainability of photovoltaics: The case for thin-film solar cells, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2746-2750.
- Fthenakis, V., Wang, W., Kim, H. C., (2009). Life Cycle Inventory Analysis of the Production of Metals Used in Photovoltaics, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 493-517.
- Gagnon, N., Hall, C. H., Brinker, L., (2009). A Preliminary Investigation of Energy Return on Energy Investment for Global Oil and Gas Production, *Energies*, 2, 490-503.
- Gaudet, G., (1984). Théorie économique et prévision en économie des ressources naturelles, *L'Actualité économique*, 60, 3, 271-279.
- Gaudet, G., (2007). Natural Resource Economics under the rule of Hotelling, *Canadian Journal of Economics*, 40, 4, 1033-1059.
- George, M.W., (2009). *Selenium and tellurium*, in *Metals and minerals*, U.S. Geological Survey Minerals Yearbook 2008, 1, pp. 65.1–65.9, accessed May 30, 2012.
- Georgescu-Roegen, N. G., (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*, Harvard University Press: Cambridge, Massachusetts.
- Georgescu-Roegen, N. G., (1975). Energy and Economic Myths, *Southern Economic Journal*, 41, 3, 347-381.

- Georgescu-Roegen, N. G., (1979). Comments on the Papers by Daly and Stiglitz, In Smith, V K, *Scarcity and Growth Reconsidered*, Resources for Future, Johns Hopkins University Press, Baltimore and London, pp. 95-105.
- Georgescu-Roegen, N. G., (2006). *La décroissance. Entropie - Ecologie - Economie.*, 3ième édition, Editions Sang de la terre, Paris, 2006, Collection "les classiques des sciences sociales".
- Giffort Pinchot (1910). *The Fight For the Conservation*, Doubleday, Page & Company, 150 p.
- Gilbert, R. J, (1979). Optimal Depletion of an Uncertain Stock, *Review of Economic Studies*, Wiley Blackwell, 46, 1, 47-57.
- Gilbert, R. J., (1978). Dominant firm pricing policy in a market for an exhaustible resource., *The Bell Journal of Economics*, 9, 2, 385-395.
- Giraud P. N. Napi C., (1994). L'économie minière ou pétrolière : deux familles résident sous le même toit, *L'Actualité économique*, 70, 4, 477-497.
- Giraud, P. N., (2008). Ressources naturelles et solidarité entre générations, S.E.R, *Etudes*, 2008/3, 408, 319-329.
- Glaister, B. J., Mudd G. M., (2010). The environmental costs of platinum–PGM mining and sustainability: Is the glass half-full or half-empty?, *Minerals Engineering*, 23, 5, 438-450.
- Gleich, B., Achzet, B., Mayer, H., Rathgeber, A., (2013). An empirical approach to determine specific weights of driving factors for the price of commodities—A contribution to the measurement of the economic scarcity of minerals and metals, *Resources Policy*, 38, 4, 350-362.
- Glynn, J., Perera, N., Verma, R., (2007). Unit root tests and structural breaks: a survey with applications, *Working paper*, University of Wollongong, 19p.
- Goeller, H. E., (1979). The Age of Substituability: A scientific Appraisal Of Natural Resource Adequacy, In: Smith, V K, *Scarcity and Growth Reconsidered*, Resources for Future, Johns Hopkins University Press, Baltimore and London, pp. 143-159.
- Goeller, H. E., Weinberg, A. M., (1978). The age of Substituability, *The American Economic Review*, 68, 6, 1-11.
- Gordon, R. B., Bertram, M., Graedel, T.E., (2006). Metal stocks and sustainability, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103, 5, 1209-1214.
- Gordon, R. J., (2012). Is U.S. Economic Growth Over? Faltering Innovation Confronts: The Six Headwinds, *NBER working papers*, No. 18315.
- Gordon, R. L., (1966). Conservation and the Theory of Exhaustible Resources, *The Canadian Journal of Economics and Political Science*, 32, 3, 319-326.
- Gordon, R. L., (1967). A reinterpretation of the pure theory of exhaustion, *Journal of Political Economy*, 75, 3, 274-286.
- Gordon, R.B., Bertram, M., Graedel, T.E., (2007). On the Sustainability of Metal Supplies: A response to Tilton and Lagos, *Resources Policy*, 32, 24-28.

Gordon, R. B., Koopmans, T. C., Nordhaus, W. D., Skinner, B. J., (1987). *Toward a New Iron Age?: Quantitative Modeling of Resource Exhaustion*, Harvard University Press, 200 pages.

Graedel, T. E., Barr, R., Chandler, C., Chase, T., Choi, J., Christoffersen, L., Friedlander, E., Henly, C., Jun, C., Nassar, N. T., Schechner, D., Warren, S., Yang, M., Zhu, C., (2012). Methodology of Metal Criticality Determination, *Environmental Science & Technology*, 46, 2, 1063-1070.

Grafton, R. Q., Adamowics, W., Dupont, D., Nelson, H., Hill, R. J., Renzetti, S., (2004). *The Economics of the Environment and Natural Resources*, Edition Wiley-Blackwell, 503p.

Granger, C. W. J., (1969). Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods, *Econometrica*, 37, 424-438.

Gray, L. C., (1914). Rent under the Assumption of Exhaustibility, *The quarterly Journal of Economics*, 28, 3, 466-489.

Green, M. A., (2006). Improved Estimates for Te and Se Availability from Cu Anode Slimes and Recent Price Trends, *Progress in Photovoltaics Research and Application*, 14, 743-751.

Greer, J. M., (2013). *La fin de l'abondance: L'économie dans un monde post-pétrole*, Edition Ecosociété, 236p.

Gregory, A. W., Hansen, B. E., (1996). Residual-based tests for cointegration in models with regime shifts, *Journal of Econometrics*, 70, 99-126.

Grosse F., (2011). Est-il possible de découpler le lien croissance/matières premières ?, *Problèmes économiques*, 3019, 25-32.

Hagelüken, C., (2011). Sustainable Resource Management in the Production Chain of Precious and Special Metals, *International Economics Of Resource Efficiency 2011*, 5, 357-369.

Hagelüken, C., Mesker, C. E. M., (2010). *Complex Life Cycles of Precious and Special Metals*. Dans : Strüngmann Forum Report, Linkages of Sustainability, Edition Thomas E. Graedel and Ester van der Voet, MIT Press, ISBN: 0-262-01358-4.

Hall, C. A. S., Balogh, S., Murphy, D. J. R., (2009). What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have?, *Energies*, 2, 25-47.

Hall, C.A.S., Lambert, J.G., Balogh, S., 2014. EROI of different fuels and the implications for society, *Energy Policy*, 64, 141-152.

Hall, D. C., Hall, J. V., (1984). Concepts and Measures of Natural Resource Scarcity with a Summary of Recent Trends, *Journal of environmental economics and management*, 11, 363-379.

Hall, D. C., Hall, J. V., Kolk, D. X., (1988). Energy in the Unit Cost Index to Measure Scarcity, *Energy*, 13, 3, 281-286.

Halvorsen, R., Smith, T. R., (1984). On Measuring Natural Resource Scarcity, *Journal of Political Economy*, 92, 5, 954-964.

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, 62-73.

- Hart, R., Spiro, D., (2011). The Elephant in Hotelling's Room, *Energy Policy*, 39, 7834-7838.
- Hayenga , M.L., Gardner, B.L., Paul, A.B., Houck, J.P., (1978). *The Concept of a Thin Market, In: Pricing Problems in the Food Industry (with Emphasis on Thin Markets)*, Edition M.L Hayenga, pp.7-13. Monograph No. 7, North Central Regional Research Project NC-117,1978.
- Heal, G. M., (1975), Economic aspects of natural resource depletion, Dans : D.W Pearce et J. Rose, *The economics of natural resource depletion*, pp. 118-139.
- Heal, G. M., (1976). The relationship between price and extraction cost for a resource with a backstop technology., *The Bell Journal of Economics*, 7, 2, 371-378.
- Hemmingsen, E., (2010). At the base of Hubbert's Peak: Grounding the debate on petroleum scarcity, *Geoforum*, 41, 531-540.
- Herfindhal, O. C., Kneese, A. V., (1974). Economic theory of natural resources, Columbus, Ohio, Merrill, 405p.
- Hernandez, M., Torero, M., (2010). Examining the Dynamic Relationship between Spot and Future Prices of Agricultural Commodities, *IFPRI Discussion Paper*, No. 00988, 38p.
- Heun, M., De Wit, M., (2012). Energy return on (energy) invested (EROI), oil prices, and energy transitions, *Energy Policy*, 40, 147-158.
- Heuterkes, E. M., (2007). Scarcity, Scarcity Knowledge and the legitimization of Market-Based Scarcity Indicators, No. 382 de Volkswirtschaftliche Diskussionsbeiträge, 22p.
- Hocquart, C., (2005). Les enjeux des nouveaux matériaux métalliques, dans *revue Géosciences du BRGM*, numéro 1, janvier 2005, pp. 6-11. Disponible à l'adresse suivante : <http://www.brgm.fr/dcenewsFile?ID=117>.
- Hocquart, C., (2012). Les métaux rares, un enjeu stratégique mondial, *Encyclopaedia Universalis*, 267-275.
- Hocquart, C., Samama, J-C., (2006). Cycles et super-cycles dans le domaine des matières premières minérales. Analyse des risques et des comportements des acteurs, *Société de l'industrie minérale*, 29.
- Hong, S. Candelone, J-P., Patterson, C. C., Boutron, C. F., (1994). Greenland Ice Evidence of Hemispheric Lead Pollution Two Millennia Ago by Greek and Roman Civilizations, *Science*, 265, 5180, 1841-1843.
- Hong, S. Candelone, J-P., Patterson, C. C., Boutron, C. F., (1996). History of Ancient Copper Smelting Pollution During Roman and Medieval Times Recorded in Greenland Ice, *Science*, 272, 5259, 246-249.
- Hotelling H., (1931). The economics of exhaustible resources, *Journal of Political Economy*, 39, 137-175.
- Hotelling, H., (1933). Analysis of a Complex of Statistical Variables with Principal Components, *Journal of Educational Psychology*, 24, 7, 498-520.
- Houthakker, H. S., (2002). Are Minerals Exhaustible?, *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 42, 2, 417-421.

<http://www.minormetals.com/?tab=1&site=4&lang=EN>

<https://www.metal-pages.com/>

Hubbert, M. K. (1956). *Nuclear Energy and the Fossil Fuels, Drilling and Production Practice*. Washington, D.C.: American Petroleum Institute.

Hubbert, M. K. (1982). Techniques of Prediction as Applied to the Production of Oil and Gas, In: S. I. Gass, ed., *Oil and Gas Supply Modelling*. Gaithersburg, MD: National Bureau of Standards, Special Publication 631.

Hubbert, M. K., (1962). *Energy Resources*, Washington, D.C.: National Research Council, National Academy of Sciences, Publication 1000-D.

Hubbert, M. K., (1967). *Degree of Advancement of Petroleum Exploration in United States*, American Association of Petroleum Geologists.

Humphrey, D., (2010). The great metals boom: a retrospective, *Resources Policy*, 35, 1-13.

International Aluminium Institute, (2008). Fourth sustainable bauxite mining report 2008, 55p.

International Energy Agency (IEA), (2008). *World Energy Outlook*, OECD-IEA, p.218, 578p.

International Energy Agency (IEA), (2010a). *World Energy Outlook*, OECD-IEA, pp. 125-126, 738p.

International Energy Agency (IEA), (2010b). *Energy Technology Perspectives. Strategies and scenarios to 2050*, in OECD/IEA Report, 710p.

International Energy Agency (IEA), (2011). *Technology Roadmap: Electric and plug-in hybrid electric vehicles*, Mise à jour juin 2011, 52p.

International Energy Agency (IEA), (2014). Statistics: Energy Balance Flows, consultable le 1^{er} mars 2014 à la page suivante: <http://www.iea.org/Sankey/index.html>.

Jacks, D. S., (2007). Populists Versus Theorists: Futures Markets and the Volatility of Prices, *Explorations in Economics History*, 44, 2, 342-362.

Jackson, B., Mikolajczak, C., (2009). Availability of Indium and Gallium, Indium Corporation.

Jäger-Waldau, A., (2012). International Journal of Photoenergy, Volume 2012, Article ID 768368, 6 pages.

Jancovici, J-M., (2011). *Changer le monde : tout un programme*, Editions Calmann-Lévy, 242p.

Jancovici, J-M., GrandJean, A., (2007). *Le plein s'il vous plait ! : La solution au problème de l'énergie*, Edition Points, 185p.

Jancovici, J-M., GrandJean, A., (2010). *C'est maintenant ! : 3 ans pour sauver le monde*, Edition Points, 285p.

Jaskula, B. W., (2010). *2010 Minerals Yearbook*, Gallium, USGS, February 2012.

- Jevons, W. S., (1865). *The coal question: an inquiry concerning the progress of the nation, and the probable exhaustion of our coal-mines*, first ed: 1865/ Basinkstoke ; New York : Palgrave, 2001.
- Johansen, S., (1988). Statistical analysis of cointegration vectors, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 12, 231-254.
- Johnson, M. H., Bell, F. W., Benett, J. M., (1980). Natural Resource Scarcity: Empirical Evidence and Public Policy, *Journal of Environmental Economics and Management*, 7, 256-271.
- Jorgenson, J. D., George, M. W., (2004). *Indium*, USGS, Open-File Report 2004-1300, 24p.
- Joseph Muir, (1901). *Our National Parks*, Boston, Houghton Mifflin; Cambridge, Mass., the Riverside press, 1929.
- JRC, Gruson, J-F., Gachadouat, S., Maisonnier, G., Saniere, A., (2005). *Prospective Analysis of the Potential Non-conventional World Oil Supply: Tar Sands, Oil Shales and Non-conventional Liquid Fuels from Coal and Gas*, European Commission, 81p.
- JRC, Moss, R.L., Tzimas, E., Kara, H., Willis P., Kooroshy J., (2011). *Critical Metals in Strategic Energy Technologies, Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies*, European Commission, 164p.
- Kamara, A., (1982). Issues in Futures Markets: A Survey, *The Journal of Futures Markets*, 2, 3, 261-294.
- Kanafani, N., (2000). Policy reform and natural resource management, Université Catholique de Louvain, 22-25.
- Kemp, M. C., (1976). How to Eat a cake of Unknown Size, In: M. C. Kemp (ed.), *Three Topics in the Theory of International Trade*, North Holland.
- Kesler, S. E., Wilkinson, B. H., (2008). Earth's copper resources estimated from tectonic diffusion of porphyry copper deposits, *Geology*, 36, 255-258.
- Kiel, K., Matheson, V., Golembiewski, K., (2010). Luck or Skill? An Examination of the Ehrlich-Simon Bet, *Ecological Economics*, 69, 1365-1367.
- King, C. W., Hall, C. A. S., (2011). Relating Financial and Energy Return on Investment, *Sustainability*, 3, 1810-1832.
- Kleijn, R., Van der Voet, E., (2010). Resource constraints in a hydrogen economy based on renewable energy sources: An exploration, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 9, 2784-2795.
- 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, 9, 5640-5648.
- Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K-H., Habert, H., Fisher-Kowalski, M., (2009). Growth in global material use, GDP and population during the 20th century, *Ecological Economics*, 68, 2696-2705.
- Krautkraemer, J. A., (1998). Nonrenewable Resource Scarcity, *Journal of Economic Literature*, 36, 4, 2065-2107.

- Krautkraemer, J. A., (2005). Economics of Natural Resource Scarcity: The State of the Debate, in: *Scarcity and Growth Revisited, Natural Resources and the Environment in the New Millennium*, Simpson Toman Ayres Editor, Resources For the Future, pp. 55-77.
- Krutilla, J. V., (1967). Conservation Reconsidered, *The American Economic Review*, 57, 4, 777-786.
- Kushnir, D., Sandén, B. A., (2012). The time dimension and lithium resource constraints for electric vehicles, *Resources Policy*, 37, 1, 93-103.
- Labys, W. C., Waddell, L. M., (1989). Commodity lifecycles in US materials demand, *Resources Policy*, 15, 3, 238-252.
- Lance, G.N., Williams, W.T., (1967). A general theory of classificatory sorting strategies. I. Hierarchical systems, *Computer Journal*, 9, 60-64.
- Landsberg, H., Tilton, J. E., (1982). Nonfuel Minerals, in: *Current Issues in Natural Resource Policy*, Portney P R. et Haas R. B. editors, The Johns Hopkins University Press, pp. 74-116.
- Lassere, P., (1985). Discovery Costs as a Measure of Rente, *The Canadian Journal of Economics*, 18, 3, 474-483.
- Lasserre, P., (1991). *Long Term Control of Exhaustible Resources*, Fundamentals of Pure and Applied Economics, Harwood Academic Publishers, pp. 16-21.
- Lawn, P., (2010). On the Ehrlich-Simon Bet: Both Were Unskilled and Simon was Lucky, *Ecological Economics*, 69, 2045-2046.
- Laznicka, P., (2010). Civilization Based on Metals, Dans: Laznicka, P, *Giant Metallic Deposits Future source of industrial metals*, springer, 964p.
- Lebart, L., Piron, M., Morineau, A., (2006). *Statistiques exploratoire multidimensionnelle : Visualisations et inférences en fouille de données*, collection sciences sup., Edition Dunod, 4^{ième} édition, 464p.
- Lee, J., List, J. A., Strazicich M. C., (2006). Non Renewable Resource prices: Deterministic or Stochastic trends?, *Journal of Environmental Economics and Management*, 51, 354-370.
- Levhari, D., Liviatan, N., (1977). Notes on Hotelling's economics of exhaustible resources, *The Canadian Journal of Economics*, 10, 2, 177-192.
- Levhari, D., Pindyck, R. S., (1979). The pricing of durable exhaustible resources, MIT - EL 79 - 053WP.
- Lewis, T. R., (1977). Attitudes towards risk and the optimal exploitation of an exhaustible resource, *Journal of Environmental Economics and Management*, 4, 2, 111-119.
- London Metal Exchange (LME), (2013). Available at: <http://www.lme.com/>.
- López, R., (2005). Intragenerational versus Intergenerational Equity. Views from the South, In: *Scarcity and Growth Revisited, Natural Resources and the Environment in the New Millennium*, Simpson Toman Ayres Editor, Resources For the Future, pp. 250-260.
- Loury, G. C., (1978). The Optimum Exploitation of Unknown Reserve, *Review of Economic Studies*, 45, 621-636.

- Lund, P. D., (2007). Upfront resource requirements for large-scale exploitation schemes of new renewable technologies, *Renewable Energy*, 32, 442-458.
- Mackellar, F. L., Vining, D. R. JR., (1989). Measuring Natural Resource Scarcity, *Social Indicators Research*, 21, 5, 517-530.
- Maddison, A., (2001). *The World Economy: A millennial Perspective*, Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Malthus, (1798). *An essay on the principle of population*, (1989), Cambridge University Press, Cambridge.
- Marshall, A., (1890). *Principles of Economics*, 8ième edition (1920), Macmillan, London.
- Marx, K., (1867). *Capital*, (1954), Progress Press, Moscow.
- Mason, L, Prior, T., Mudd, G., Giurco, D., (2011). Availability, Addiction and Alternatives: Three Criteria for Assessing the Impact of Peak Minerals on Society, *Journal of Cleaner Production*, 19, 958-966.
- Mayumi, K., Giampietro, M., Gowdy, J. M. (1998). Georgescu-Roegen/Daly versus Solow/Stiglitz Revisited, *Ecological Economics*, 27, 115-117.
- McDonough, W., Braungart, M., (2011). *Cradle to Cradle - créer et recycler à l'infini*, Manifestô.
- McKelvey, V. E., (1960). Relation of reserves of the elements to their crustal abundances, *American Journal of Science*, 258-A, 234-241.
- McKelvey, V.E., (1972). Mineral Resource Estimates and Public Policy, *American Scientist*, 60, 1, 32-40.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., (1992). *Beyond The Limits: Confronting Global Collapse, Envisioning a Sustainable Future*, Edition Chelsea Green Publishing Co, 300p.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., (2004). *The Limits to Growth : The 30 years Update*, Earthscan Ltd, 362p.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., Behrens, W. W., (1972). *The Limits to Growth*, New York, Universe Books.
- Mearns, E., (2008). In: *The global energy crises and its role in the pending collapse of the global economy*, Royal Society of Chemists, Aberdeen, Scotland, October 29th, 2008; Aberdeen, Scotland, 2008.
- Memary, R., Giurco, D., Mudd, G., Mason, L., (2012). Life Cycle Assessment: a Time-Series Analysis of Copper, *Journal of Cleaner Production*, 33, 97-108.
- Menzie, W. D., Singer, D. A., Deyoung, J. H., (2005). Mineral Resources and Consumption in the Twenty-First Century, In: *Scarcity and Growth Revisited, Natural Resources and the Environment in the New Millennium*, Simpson Toman Ayres Editor, Resources For the Future, pp. 33-53.

- Messner, F., (2002). Material substitution and path dependence: empirical evidence on the substitution of copper for aluminum, *Ecological Economics*, 42, 1-2, 259-271.
- Metal Bulletin (2013). Available at: <http://www.metalbulletin.com/>.
- Mill, J. S., (1848). Principles of Political Economy, J.W Parker, London.
- Missemer, A., (2012). William Stanley Jevon's The coal Question (1865), beyond the rebound effect, *Ecological Economics*, 82, 97-103.
- Mohr, S. H., Evans, G. M., (2009). Forecasting coal production until 2100, *Fuel*, 88, 2059-2067.
- Moosa, I. A., (2002). Price Discovery and Risk Transfert in the Crude Oil Futures Market : Some Structural Time Series Evidence, *Economic Notes*, Volume 31, No. 1, pp. 155-165.
- Moss, R.L., Tzimas, E., Kara, H., Willis, P., Kooroshy, J., (2013). The potential risks from metals bottlenecks to the deployment of Strategic Energy Technologies, *Energy Policy*, 35, 556-564.
- Mudd, G., (2007). An Analysis of Historic Production Trends in Australian Base Metal Mining Ore, *Geology Reviews*, 32, 1–2, 227-261.
- Mudd, G., (2010). The Environmental Sustainability of Mining in Australia: Key Mega-Trends and Looming Constraints, *Resources Policy*, 35, 2, 98-115.
- Mudd, G., Diesendorf, M., (2008). Sustainability of Uranium Mining and Milling: Toward Quantifying Resources and Eco-Efficiency, *Environmental Science and Technology*, 42, 7, 2624–2630.
- Murphy, D.J., (2011). The Energy Return on Investment Threshold and the Growth of Renewable Energy, Annual Conference of the United States Association for the Study of Peak Oil and Gas, Washington, D.C. November 2-5th 2011.
- N’Zue, F. F., (1995). Success and failure of agricultural futures contracts, how to best predict semivariance, and GARCH option pricing with implied volatility. Unpublished Ph.D. dissertation, Department of Agricultural Economics, Oklahoma State University, Stillwater.
- Nakache, J. P., Confais, J., (2005). *Statistique explicative appliquée*, Editions Technip, 283p.
- 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 and Technology*, 46, 2, 1071-1078.
- National Defense Stockpile, (2009). *Reconfiguration of the National Defense Stockpile Report to Congress*. Disponible à l’adresse suivante : http://www.acq.osd.mil/mibp/docs/nds_reconfiguration_report_to_congress.pdf.
- National Research Council, (2008). *Managing Materials for a Twenty-first Century Military*, 208p. Disponible à l’adresse suivante : http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12028.
- Naumov, A. V., (2010). Selenium and Tellurium: State of the markets, the crisis, and its consequences, *Metallurgist*, 54, 197-200.

- Naumov, A. V., Grinberg, E. E., (2009). Several Peculiarities in the Analysis of the Markets of Rare and Scattered Metals after 2004, *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 50, 1, 61–68.
- Netz, J. S., (1995). The Effect of Futures Markets and Corners on Storage and Spot Price Variability, *American Journal of Agricultural Economics*, 77, 1, 182-193
- Neumayer, E., (2000). Scarce or Abundant? The Economics of Natural Resources Availability, *Journal of economic surveys*, 14, 3, 307-335.
- Neumayer, E., (2003). *Weak versus strong sustainability: exploring the limits of two opposing paradigms*, Edward Elgar, 271p.
- Noorgard, R. B., (1990). Economic indicators of Resource Scarcity: A Critical Essay, *Journal of Environmental Economics and Management*, 19, 19-25.
- Noorgard, R. B., (1991). Economic indicators of resource scarcity: A More Critical Reply, *Journal of Environmental Economics and Management*, 21, 2, 195-199.
- Noorgard, R. B., Leu, G. J., (1986). Petroleum Accessibility and Drilling Technology: An Analysis of US Development Costs from 1959 to 1978, *Land Economics*, 62, 1, 14-25.
- Nordhaus, W. D., (1973). The allocation of Energy Resources, In: Heal, G., (1993) *The Economics of Exhaustible Resources*, Elgar Reference Collection, pp. 245-293.
- Nordhaus, W. D., (1974). Resources as constraint on Growth, *American Economic Review*, American Economic Association, 64, 2, 22-26.
- Norgate, T., Haque, N., (2010). Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations, *Journal of Cleaner Production*, 18, 266-274.
- Norgate, T., Jahanshahi, S., (2010). Low grade ores - Smelt, leach or concentrate?, *Minerals Engineering*, 23, 2, 65-73.
- Norgate, T., Jahanshahi, S., (2011). Reducing the greenhouse gas footprint of primary metal production: Where should the focus be?, *Minerals Engineering*, 24, 14, 1563-1570.
- Northey, S., Haque, N., Mudd, G., (2013). Using Sustainability Reporting to Assess the Environmental Footprint of Copper Mining, *Journal of Cleaner Production*, 40, 118-128.
- OECD, (2012). *Medium And Long-Term Scenarios For Global Growth And Imbalances*, OECD Economic Outlook, Volume 2012/1, 34p.
- Ozdemiroglu, E., (1993). Measuring Natural Resource scarcity: A study of The Price Indicator, CSERGE, *Working Paper GEC 93-14*, ISSN 0967-8875, 28p.
- Packey, D. J., (2012). Multiproduct mine output and the case of mining waste utilization, *Resources Policy*, 37, 104–108.
- Paley Commission, (1952). *Resources for Freedom: Foundations for Growth and Security*, President's materials policy commission, 5 volumes, Etats-Unis, Washington.
- Panzar, J. C., Willig, R. D., (1977). Economies of Scale in Multi-Output Production, *The Quarterly Journal of Economics*, 91, 3, 481-493.

- Panzar, J. C., Willig, R. D., (1981). Economies of Scope, *The American Economic Review*, 71, 2, 268-272.
- Pearce, D. W., Turner, R. K., (1990). *Economics of Natural Resources and the Environment*, The Johns Hopkins University Press, Second Printing 1990, Baltimore, 378p.
- Pearson, K., (1901). On Lines and Planes of Closest Fit to Systems of Points in Space, *Philosophical Magazine*, 2, 6, 559-572.
- Peck, A. E., (1976). Futures Markets, Supply Response, and Price Stability, *The Quarterly Journal of Economics*, 90, 3, 407-423.
- Peiró, L. T., Méndez, G. V., Ayres, R. B., (2011). Rare and Critical Metals as By-products and the Implications for Future Supply, *INSEAD working paper*, 2011/129/EPS/TOM/ISIC.
- Percebois, J., (2009). Prix Internationaux du pétrole, du gaz naturel, de l'uranium et du charbon : La théorie économique nous aide-t-elle à comprendre les évolutions ?, *Cahiers de Recherche*, CREDEN, No. 09.02.81.
- Perman, R., Ma, Y., Common, M., Maddison, D., Mcgilvray, J., (2011). *Natural Resource and Environmental Economics*, Edition Addison Wesley, 4ième édition, 744p.
- Perron, P., (1997). Further evidence on breaking trend functions in macroeconomic variable, *Journal of Econometrics*, 80, 2, 355-385.
- Peterson, F. M., Fisher, A. C., (1977). The Exploitation of Extractive Resources: A Survey, *Economic Journal*, 87, 348, 681-721.
- Peterson, F.M. (1975), Two Externalities in Petroleum Exploitation, in: G.M. Brannon, ed., *Studies in Energy Tax Policy*, Ballinger, Cambridge, Mass.
- Peterson, H. H., (2005). Trading Behavior in a Marginal Organized Market, *Journal of Agricultural and Resources Economics*, 3, 3, 347-362.
- Phillips, P., Perron, P., (1988). Testing for a Unit Root in Time Series Regression, *Biomètrika*, 75, 2, 335-346.
- Phillips, W. G. B., Edwards, D. P., (1976). Metal price as a function of ore grade. *Resources Policy*, 2, 3, 167-178.
- Pihl, E., Kushnir, D., Sandén, B., Johnsson, F., (2012). Material constraints for concentrating solar thermal power, *Energy*, 44, 944-954.
- Piketty, T., (2013). *Le capital au XXIe siècle*, Edition Seuil, Collection Les Livres du Nouveau Monde, 970p.
- Pindyck R.S., (1999). The Long Run Evolution of Energy Prices, *The Energy Journal*, 20, 2, 1-27.
- Pindyck, R. S., (1978). The Optimal Exploration and Production of Nonrenewable Resources, *Journal of Political Economy*, 86, 5, 841-861.
- Pindyck, R. S., (1980). Uncertainty and Exhaustible Resource Markets, *Journal of Political Economy*, 88, 6, 1203-1225.

- Pindyck, R. S., (1981). The Optimal Production of an Exhaustible Resource When Price Is Exogenous and Stochastic, *The Scandinavian Journal of Economics*, 83, 2, 277-288.
- Pindyck, R. S., (1982). Jointly Produced Exhaustible Resources, *Journal of Environmental Economics and Management*, 9, 4, 291-303.
- Pretty, J., (2013). The consumption of a Finite Planet: Well-Being, Convergence, Divergence and the Nascent Green Economy, *Environmental and Resource Economics*, 55, 4, 475-499.
- Prior, T., Giurco, D., Mudd, G., Mason L., Behrisch, J., (2011). Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management, *Global Environmental Change*, 22, 3, 577-587.
- Rabinovitch, M., (2011). Métaux mineurs : une vision géologique des tensions, *Géologues*, 170, 14-17.
- Rankin, W. J., (2011). Minerals, Metals and Sustainability: Meeting Future Material Needs, Edition CRC Press Inc, 440p.
- Reuter, (2011). Goldman's new money machine: warehouses, article de Simon Robinson, accessible le 1/06/2014 à l'adresse suivante : <http://www.reuters.com/article/2011/07/29/us-lme-warehousing-idUSTRE76R3YZ20110729>.
- Reynès, F., Okullo, S., Hofkes, M., (2010). How does economic theory explain the Hubbert peak oil model ?, *USAEE Working Paper*, 10-052, available at SSRN Nov 2010.
- Reynolds, D. B., (1999). The mineral economy: how prices and costs can falsely signal decreasing scarcity, *Ecological Economics*, 31, 155-166.
- Reynolds, D. B., Baek, J., (2012). Much ado about Hotelling: Beware the ides of Hubbert, *Energy Economics*, 34, 162-170.
- Ricardo, D., (1817). *Des principes de l'économie politique et de l'impôt*, Flammarion (1999), 512p.
- Roberts, F., Torrens, I., (1974). Analysis of the life cycle of non ferrous minerals, *Resources Policy*, 1, 1, 14-28.
- Robinson T. J. C., (1989). *Economic theories of exhaustible resources*, Edition Routledge, london, 1989, 200p.
- Rosenau-Tornow, D., Buchholz, P., Riemann, A., Wagner, M., (2009). Assessing the long-term supply risk for mineral raw materials- a combined evaluation of past and future trends, *Resources Policy*, 34, 161-175.
- Roskill, (2009). *The Economics of Lithium*, 11th ed. Roskill Information Services Ltd., London.
- Rostek M., Weretka, M., (2008). Thin Markets, In: *The New Palgrave Dictionary of Economics*, Second Edition, Edition Steven N. Durlauf and Lawrence E. Blume. Palgrave Macmillan, 2008
- Rotillon, G., (2005). *Economie des ressources naturelles*, Collection repères, Edition la découverte, 123p.

- Saadi, H., (2005). *L'économie des matières premières*, Harmattan editor, Esprit Economique collection, 366p.
- Salant, S. W., (1976). Exhaustible Resources and Industrial Structure: A Nash-Cournot Approach to the World Oil Market., *Journal of Political Economy*, 84, 5, 1079-1094.
- Santopietro, G. D., (1998). Alternative Methods for Estimating Resource Rent and Depletion Cost: the Case of Argentina's YPF, *Resources Policy*, 24, 1, 39-48.
- Saporta, G., (2006). *Probabilités, analyses des données et statistiques*, 2^{ième} édition révisée et augmentée, Editions Technip, Paris, 622p.
- Schmidt, M., (2012). Resource Efficiency - What Are Critical Metals and How Scarce are They?, Conference Electronic Displays 2012 in Nuremberg. 7p.
- Schodde, R.C., (2010). The key drivers behind resource growth: an analysis of the copper industry over the last 100 years, presentation to the Mineral Economics & Management Society (MEMS) session at the 2010 SME Annual Conference, Phoenix, Arizona March 2010.
- Schodde, R.C., (2011). Recent trends in mineral exploration - are we finding enough?, presentation to the RMG 8th Annual Mining and Exploration Investment Conference, Stockholm, 2011.
- Schumacher, E. F., (1973). *Small Is Beautiful: Economics as if People Mattered*, Harper Perennial Publisher, 352 p.
- Schwarz-Schampera, U., Herzig, P., (2002). *Indium Geology, Mineralogy, and Economics*, Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K, 272p.
- Sehgal, S., Rajput, N., Dua R. D., (2012). Futures Trading and Spot Market Volatility: Evidence from Indian Commodity Markets, *Asian Journal of Finance & Accounting*, 4, 2, 199-217.
- Seurot, (2006). La croissance imperceptible en Europe du IX^e au XIV^e siècle : approches qualitatives et repères quantitatifs, papier présenté lors de la journée histoire économique et quantification (2006). En ligne sur <http://afhe.ehess.fr/document.php?id=322>.
- Sharma, A., Balcombe, K. G., Fraser, I. M., (2009). Non Renewable Prices: Structural Breaks and Long Term Trends, *Economics Bulletin*, 29, 2, 805-819.
- Simmons, M. R., (2000). Revisiting the Limits to Growth: Could The Club of Rome have been correct, after all?, *An Energy White Paper*.
- Simon, J. L., (1981). *The Ultimate Resource*, Princeton University Press, 415p.
- Simon, J. L., (1996). *The Ultimate Resource 2*, Princeton University Press, New Ed edition, 778p.
- Simpson, D., Toman, M. A., Ayres, R. U. (2005). The "new scarcity", In: *Scarcity and Growth Revisited, Natural Resources and the Environment in the New Millennium*, Simpson Toman Ayres Editor, Resources For the Future, pp. 1-32.
- Sims, C. A., (1972). Money, Income, and Causality, *American Economic Review*, 62, 4, 540-552.

- Singer, D. A., (1977). Long term Adequacy of Metal Resources, *Resources Policy*, 3, 2, 127-133.
- Singh, S. R., (2011). Life Cycle Assessment and Economic Aspects of Laterally Integrated Solar Cell, Thesis Submitted To The Faculty Of The Graduate School Of The University Of Minnesota, 85p.
- Skinner, B. J., (1976). A Second Iron Age Ahead?, *American Scientist*, 64, 3, 258-269.
- Skinner, B. J., (2001). Exploring the Resource Base, Resources For the Future, Keynote talk presented at the workshop on "The Long-Run Availability of Minerals", 24p.
- Slade, M. E., (1982). Trends in Natural-Resource Commodity Prices: an Analysis of the Time Domain, *Journal of environmental economics and management*, 9, 122-137.
- Slade, M. E., (1985). Non informative Trends in Natural Resource Commodity Prices: U-Shapped Price Paths Exonerated, *Journal of environmental economics and management*, 12, 181-192.
- Slade, M. E., (1992). Do markets underprice Natural-Resource Commodities?, Policy Research, *Working paper*, World Developpement Report, pp. 10-11.
- Smith, A., (1776). Recherche sur la nature et les causes de la Richesse des Nations, *Economica* (2000).
- Smith, J. M., (2011). On the Portents of Peak Oil (and Others Indicators of Resource Scarcity), *MIT Center for Energy and Environmental Policy Research*.
- Smith, V. K., (1978a). Measuring Natural Resource Scarcity: Theory and Practice, *Journal of Environmental Economics and Management*, 5, 150-171.
- Smith, V. K., (1978b). Scarcity and Growth Reconsidered, *American Journal of Agricultural Economics*, 60, 2, 284-289.
- Smith, V. K., (1979). Natural Resource Scarcity: A Statistical Analysis, *The Review of Economics and Statistics*, 61, 3, 423-427.
- Smith, V. K., (1980). The Evaluation of Natural Resource Adequacy: Elusive Quest or Frontier of Economic Analysis, *Land economics*, 56, 258-298.
- Smith, V. K., (1990). Can we measure the economic value of environmental amenities?, *Southern Economic Journal*, 56, 4, 865-878.
- Smith, V. K., Krutilla , J. V., (1979). Resource and Environmental Constraints to Growth, *American Journal of Agricultural Economics*, 61, 3, 395-408.
- Smith, V. K., Krutilla , J. V., (1984). Economic Growth, Resource Availability, and Environmental Quality, *The American Economic Review*, 74, 2, 226-230.
- Sokal, R., Sneath, P. H. A., (1963). *Principles of Numerical Taxonomy*, San Francisco: W.H. Freeman.
- Solow, R., (1974a). The Economics of Resources or the Resources of Economics, *The American Economic Review*, 64, 2, 1-14.

- Solow, R., (1974b). Intergenerational Equity and Exhaustible Resources, *Review of Economic Studies*, 29-45.
- Solow, R., (1997). Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz Reply, *Ecological Economics*, 22, 267-268.
- Solow, R., Wan, F. Y., (1976). Extraction costs in the theory of exhaustible resources, *The Bell Journal of Economics*, 7, 2, 359-370.
- Sorley, W. R., (1889). Mining Royalties and their effect on the iron and coal trades, *Royal Statistical Society Journal*, 52, 60-98.
- Sorrell, S. and Speirs, J. (2009). Global Oil Depletion: An Assessment of the Evidence for Near-Term Physical Constraints on Global Oil Supply. UKERC Report ISBN 1-903144-0-35. UKERC
- Stamp, A., Lang, D. J., Wäger, P. A., (2012). Environmental Impacts of a Transition Toward e-Mobility: the Present and Future role of Lithium Carbonate Production, *Journal of Cleaner Production*, 23, 1, 104-112.
- Steen, B. A., (2006). Abiotic Resource Depletion. Different perception of the problem with mineral deposits, *International Journal of Life Cycle Assessment*, 11, 1, 49-54.
- Steen, B., Borg, G., (2002). An Estimation of the cost of sustainable production of metal concentrates from the earth's crust, *Ecological Economics*, 42, 3, 401-413.
- Steinbach, V., Wellmer, F-W., (2010). Consumption and Use of Non-Renewable Mineral and Energy Raw Materials from an Economic Geology point of View, *Sustainability*, 2, 1408-1430.
- Steinberger, J. K., Krausmann, F., Eisenmenger, N., (2010). Global patterns of materials use: A socioeconomics and geophysical analysis, *Ecological Economics*, 69, 1148-1158.
- Stern, D. I, (1999a). Use value, Exchange value, and Resource Scarcity, *Energy policy*, 27, 469-476.
- Stern, D. I., (1999b). Is Energy Cost an Accurate Indicator of Natural Resource Quality?, *Ecological Economics*, 31, 381-394.
- Stern, D. I., (2011). From Correlation to Granger Causality, Crawford School Research Paper, No. 13. Paper presented at the AIJOS Capstone Conference, University of Michigan, Ann Arbor MI, 29-30 September 2011.
- Stern, D. I., Kander, A., (2012). The Role of Energy in the Industrial Revolution and Modern Economic Growth, *Energy Journal*, 33, 3, 125-152.
- Stewart, M. B., (1980). Monopoly and the Intertemporal Production of a Durable Extractable Resource, *The Quarterly Journal of Economics*, 94, 1, 99-111.
- Stiglitz, J. E., (1974). Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths, *Review of Economic Studies*, Symposium on the Economics of Exhaustible Resources, pp. 123-37.
- Stiglitz, J. E., (1976). Monopoly and the rate of extraction of exhaustible resources, *American Economic Review*, Volume 66, No. 4, pp. 655-661.

- Stiglitz, J. E., (1979). A Neoclassical Analysis of the Economics of Natural Resources, In: Smith, V K, *Scarcity and Growth Reconsidered*, Resources for Future, Johns Hopkins University Press, Baltimore and London, pp. 36-66.
- Stiglitz, J. E., (1997). Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz Reply, *Ecological Economics*, Volume 22, 269-270.
- Stiglitz, J.E., (1975). The Efficiency of Market Prices in Long Run Allocations in the Oil Industry, in G.M. Brannon, ed., *Studies in Energy Tax Policy*, Ballinger, Cambridge.
- Stiglitz, J.E., Sen, A., Fitoussi, J-P., (2009). *Rapport de la Commission sur la mesure des performances économiques et du progrès social*, 324p.
- Stockholm Environment Institute, (2012). *Metals in a Low-Carbon Economy: Resource Scarcity, Climate Change and Business in a Finite World*, Project Report - 2012, 56p.
- Stollery, K. E. (1987). Mineral Processing in an Open Economy, *Land Economics*, 63, 2, 128-136.
- Stollery, K. R., (1990). The discount rate and resource extraction, A simulation approach, *Resources Policy*, 16, 1, 47-55.
- Stroup, R., Baden, J., (1979). Property Rights and Natural Resource Management, *Literature of Liberty*, 2, 4, 5-44.
- Svedberg, P., Tilton, J. E., (2006). The Real, Real Price of Nonrenewable Resources: Copper 1870–2000, *World Development*, 34, 3, 501–51.
- Svedberg, P., Tilton, J. E., (2011). Long Term Trends in the Real Real Prices of Primary Commodities: Inflation Bias and the Prebisch-Singer Hypothesis, *Resources Policy*, 36, 91-93.
- Swanson, T., (1996). Small is Stupid: Blowing the Whistle on the Greens by Wilfred Beckerman. Review by: Timothy Swanson, *The Economic Journal*, 106, 437, 1081-1083.
- Tainter, J., (2013). *L'effondrement des sociétés complexes*, Edition Le Retour aux Sources, 318p.
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., (1985). *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford.
- Telser, L. G., (1977). Organized Futures Markets: Costs and Benefits, *Journal of Political Economy*, 85, 5, 969-1000.
- Tharumarajah, A., Koltun, P., (2011). *Cradle To Gate Assessment Of Environmental Impact Of Rare Earth Metals*, 7th Australian Conference on Life Cycle Assessment, Melbourne, Vic, Australia, 9-10 March 2011, 5p.
- Tilton J.E., (1996). Exhaustible Resources and Sustainable Development - Two Different Paradigms, *Resources Policy*, 22, 91-97.
- Tilton, J. E., (2003). *On borrowed Time - Assessing the threat of mineral depletion*, Resources For the Future, Washington DC, 168p.

- Tilton, J. E., Lagos, G., (2007). Assessing the long-run availability of copper, *Resources Policy*, Volume 32, pp. 19-23.
- Toda, H.Y., Yamamoto, T., (1995). Statistical Inferences in Vector Autoregressions with Possibly Integrated Processes, *Journal of Econometrics*, 66, 1-2, 225-250.
- Toth, R., Farkas, M. F., (2011). The Relationship Between Scarcity of Natural Resources and their Real Prices, *International Journal of Economics and Finance Studies*, 3, 1, 173-185.
- Trainer, F. E., (1982). Potentially recoverable resources. How recoverable?, *Resources Policy*, 8, 1, 41-52.
- Trainer, F. E., (1983). The Relationship Between Resources and Living Standards, *Resources Policy*, 9, 1, 43-53.
- Trainer, F. E., (1986). A Critical Examination of the Ultimate Resource and The Resourceful Earth, *Technological Forecasting & Social Change*, 30, 19-37.
- Trainer, F. E., (1999). The limits to growth argument now, *The environmentalist*, 19, 325-335.
- TRU, (2020). Shocking Future Battering the Lithium Industry through 2020, 3rd Lithium Supply & Markets Conference, 24S.
- Turner, G. M., (2008). A comparison of The Limits to Growth with 30 years of reality, *Global Environmental Change*, 18, 397– 411.
- Turner, R. K. (1997). Forum Georgescu Roegen versus Solow/ Stiglitz: a pluralistic and interdisciplinary perspective, *Ecological Economics*, 22, 299-302.
- Turner, R. K., (1991). Environment, Economics, and Ethics, In: Pearce D.W. (ed), *Blueprint Greening the world economy*, Earthscan Publication Ltd, London.
- U.S Department Of Energy, (2010). Critical materials strategy, December, 166p.
- U.S Department of Energy, National Renewable Energy Laboratory, (2000). Assessment of critical thin film resources—Tellurium: National Renewable Energy Laboratory Contract no. RAF-9-29609, 34 p., accessed May 30, 2012.
- UKERC, (2013a). *Materials Availability: Potential constraints to the future low-carbon economy*, Working Paper I: Thin Film Photovoltaics, April 2011: UKERC/WP/TPA/2011/002, 88p.
- UKERC, (2013b). *Materials Availability: Potential constraints to the future low-carbon economy*, Working Paper III: Batteries, Magnets and Materials, February 2013: UKERC/WP/TPA/2013/003, 102p.
- UKERC, (2013c). *Materials Availability: Comparison of Material Criticality Studies - Methodologies and Results*, Working Paper III: Batteries, Magnets and Materials, February 2013: UKERC/WP/TPA/2013/002, 30p.
- Ulph, A. M., Folie, G. M., (1980). Exhaustible Resources and Cartels: An Intertemporal Nash-Cournot Model, *The Canadian Journal of Economics*, 13, 4, 645-658.
- UNEP, (2011a). *Estimating Long-Run Geological Stocks of Metals*, International Panel on Sustainable Resource Management, Working Group on Geological Stocks of Metals: T.E.

Graedel, R. Barr, D. Cordier, M. Enriquez, C. Hagelüken, N.Q. Hammond, S. Kesler, G. Mudd, N. Nassar, J. Peacey, B.K. Reck, L. Robb, B. Skinner, I. Turnbull, R. Ventura Santos, F. Wall, D., Wittmer. Working Paper, April 6, 2011, 32p.

UNEP, (2011b). *Recycling rates of metals, A status report*, United Nation Environment Programme, International Resource Panel, 48p.

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.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, (2013). *World Population Prospects: The 2012 Revision, Highlights and Advance Tables*, Working Paper No. ESA/P/WP.228.

United States of Geological Survey (USGS), (2012). *Mineral Commodities Summary*, Indium and Statistics Information, prepared by Amy C. Tolcin, January 2012, Available at: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/indium/mcs-2012-indiu.pdf>

Uri, N. D., (1995). A Reconsideration of Effect of Energy Scarcity on Economic Growth, *Energy*, 20, 1, 1-12.

USGS (2012), *Commodity Statistics and Information*. Disponible à l'adresse suivante : <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/>.

USGS, (2013). *Cobalt, USGS, Mineral Commodity Summaries*, 2p. Available at: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cobalt/index.html#mcs>.

USGS, (2014). *Commodity Statistics and Information*, disponible à l'adresse suivante: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/>.

Valéro, A., Botero., E., (2002). Exergetic Evaluation of Natural Mineral Capital (2): Application of the Methodology to Current World Reserves In: Proceedings of ECOS 2002. 15th International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. TU-Berlin, Berlin, Germany, pp. 62-68.

Valero, A., Valero, A., Dominguez, A., (2011). Trends of exergy costs and ore grade in global mining, In: Proceedings of SDIMI 2011. *Sustainable Development in the Minerals Industry*, pp. 301-316.

Vallée, A., (2002). *Economie de l'environnement*, Edition Points, Collection Points Economie, 374p.

Varet, J., (2014). Ressources minérales et développement durable, l'encyclopédie du développement durable. Disponible le 20/06/2014 à l'adresse suivante : <http://encyclopedie-dd.org/encyclopedie/territoires/3-2-les-ressources-minerales/ressources-minerales-et.html>.

Verhoef, E. V., Dijkema, G. P. J., Reuter, M. A., (2004). Process Knowledge, System Dynamics, and Metal Ecology, *Journal of Industrial Ecology*, 8, 1-2, 23-43.

Victor, P. A., (1991). Indicator of sustainable development: some lesson from capital theory, *Ecological Economics*, 4, 191-213.

- Vidal, O., Goffé, B., Arndt, N., (2013). Metals for a low-carbon society, *Nature Geoscience*, 6, 894–896.
- Wager, P., Classen, M., (2006). Metal Availability and Supply: the Many Facets of Scarcity, article présenté à la conference Material, Minerals, & Metal Ecology 06 The Technological Solution to Sustainability.
- Wall, G. (1986). Exergy Conversion in the Swedish Society, *Energy*, 11, 435-444.
- Watkins, G. C., (2006). Oil Scarcity: What have the Past Three Decades Revealed? *Energy Policy*, 34, 5, 508-514.
- Weaver, R. D., Banerjee, A., (1990). Does Futures Trading Destabilize Cash Prices? Evidence for U.S. Live Beef Cattle, *The Journal of Futures Markets*, 10, 1, 41-60.
- Weinstein, M. C., Zeckhauser, R. J., (1975). The optimal consumption of depletable natural resources, *The Quarterly Journal of Economics*, 89, 3, 371-392.
- Wong, S. L., Chia, W-M., Chang, Y., (2013). Energy consumption and energy R&D in OECD: Perspectives from oil prices and economic growth, *Energy Policy*, 62, 1581-1590.
- Woodhouse, M., Goodrich, A., Margolis, R., James, T., Dhere, R., Gessert, T., Barnes, T., Eggert, R., Albin, D., (2012). Perspectives on the pathways for cadmium telluride photovoltaic module manufacturers to address expected increases in the price for tellurium, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 115, 199-212.
- World Mining data, (2011). Mineral production, Volume 26, Vienne. Disponible à l'adresse suivante : <http://www.wmc.org.pl/sites/default/files/WMD2011.pdf>.
- Yaksic, A., Tilton, J. E., (2009). Using the Cumulative Availability Curve to Assess the Threat of Mineral Depletion: The Case of Lithium, *Resources Policy*, 34, 4, 185-194.
- Yang, C-J., (2009). An impending platinum crisis and its implications for the future of the automobile, *Energy Policy*, 37, 1805-1808.
- Yang, J., Balyeat, R. B., Leatham, D. J., (2005). Futures Trading Activity and Commodity Cash Price Volatility, *Journal of Business Finance & Accounting*, 32, 1-2, 297-323.
- Zapata, H., Fortenbery, T. R., Armstrong, D., (2005). Price Discovery in the World Sugar Futures and Cash Markets: Implications for the Dominican Republic, *Staff Paper Series*, No.469, Department of Agricultural & Applied Economics, University of Wisconsin-Madison.

ANNEXES

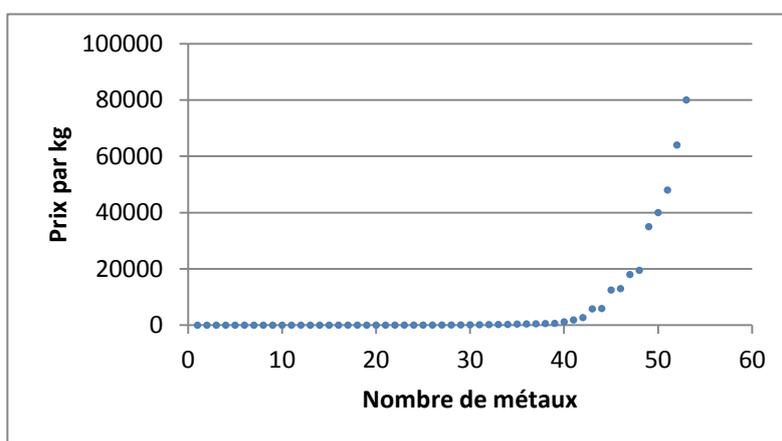
1 Annexes au chapitre 1

1.1 Transformation des variables et autres annexes relatives à l'ACP

Linéarisation des variables

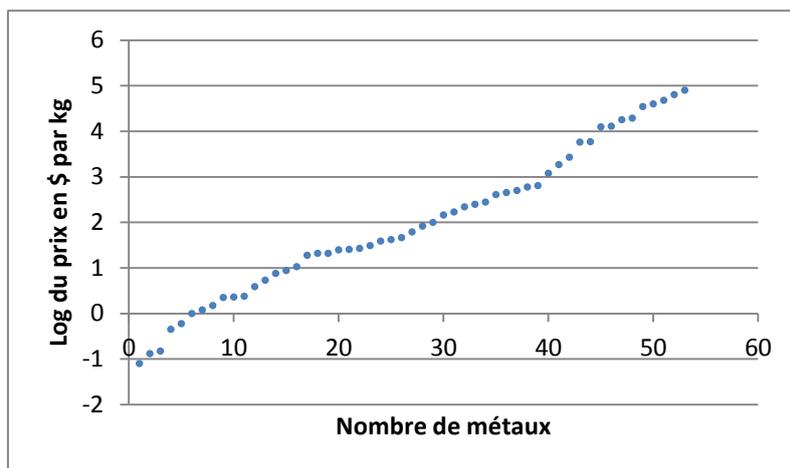
Certaines variables ont nécessité une linéarisation de leur valeur (passage en log) pour les rendre compatible avec l'analyse en composantes principales qui repose sur l'établissement de corrélations linéaires entre les variables.

Le prix présente par exemple une évolution non linéaire des valeurs prises par les métaux.



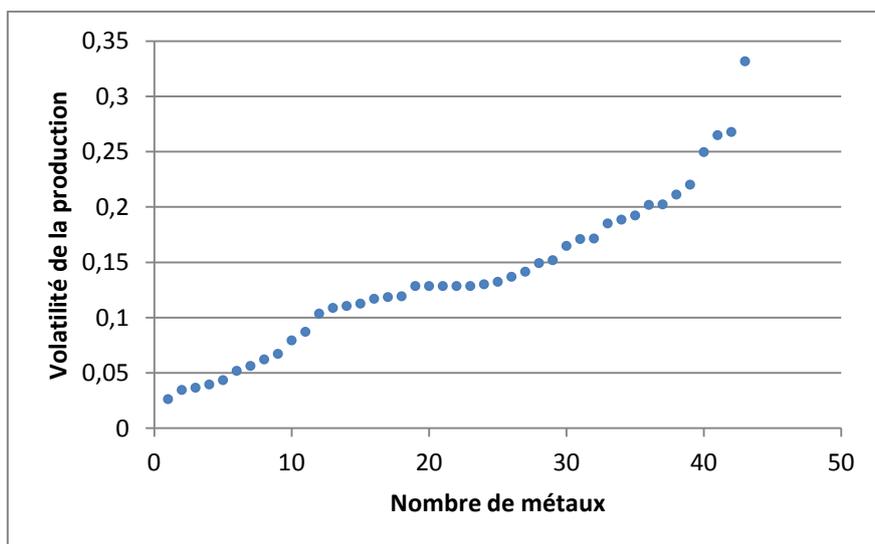
Annexe 1-1 Détection de phénomènes non linéaire. Source : calculs de l'auteur

Ce qui peut être corrigé en passant la variable en log :



Annexe 1-2 Correction d'un phénomène non linéaire. Source : *calculs de l'auteur*

A l'inverse certaines variables comme la volatilité de la production n'ont pas été linéarisées car elles ne suivaient pas ce type d'évolution exponentielle :



Annexe 1-3 Une variable non linéarisée. Source : *calculs de l'auteur*

	Indicateur	Concentration géo.	Prix (\$/kg)	Production (t)	HHI5	Recyclage	Marché (M\$)	Vol. Prod.	Vol. Prix	Sproduit
Métaux mineurs	Min	0,001	0,08	118	496	1%	24	0,067	0,090	0%
	Max	425	2700	7850000	5834	100%	9656	0,332	1,174	100%
	Moyenne	50	253	536567	2698	13%	1712	0,165	0,458	78%
	ecart type	108	555	1667961	1918	28%	2272	0,061	0,263	42%
Métaux précieux	Min	0,0007	643	47	188	50%	88	0,037	0,125	0%
	Max	0,0750	48000	23100	2556	100%	102400	0,172	0,389	100%
	Moyenne	0,0199	22001	5217	1159	70%	25993	0,088	0,214	60%
	ecart type	0,0312	21610	10051	1026	27%	43070	0,056	0,106	55%
Métaux majeurs	Min	2	0,15	277000	375	50%	2958	0,026	0,118	0%
	Max	82300	21	1030000000	4613	100%	154500	0,202	0,347	0%
	Moyenne	15348	6	102766727,3	1161	95%	44928	0,090	0,248	0%
	ecart type	28156	8	307746392,2	1219	15%	53161	0,059	0,074	0%

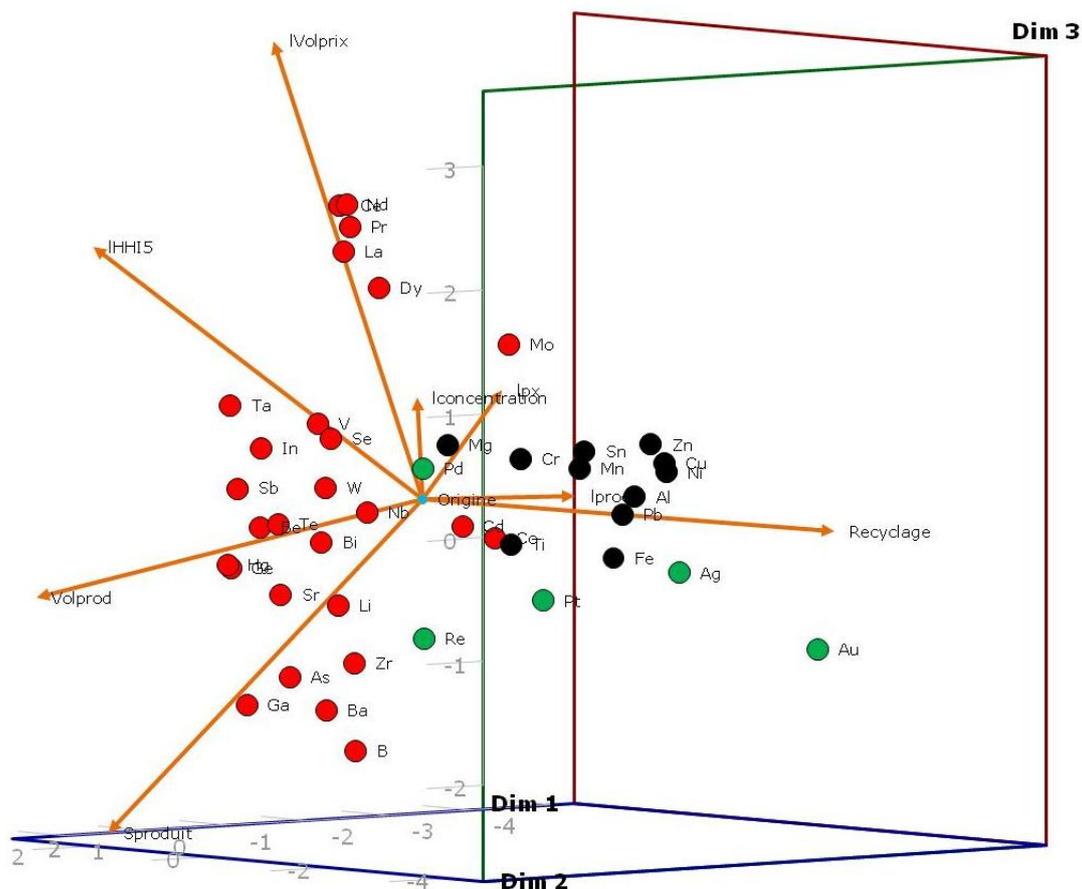
Annexe 1-4 Indicateurs statistiques pour différents groupes de métaux, concentration géologique en ppm. Source : calculs de l'auteur

Table 10.2 Applications in which minor/technology metals are used.

	Bi	Co	Ga	Ge	In	Li	REE	Re	Se	Si	Ta	Te	Ag	Au	Ir	Pd	Pt	Rh	Ru
Pharmaceuticals																			
Medical/dentistry																			
Superalloys																			
Magnets																			
Hard Alloys																			
Other alloys																			
Metallurgical ^(a)																			
Glass, ceramics, pigments ^(b)																			
Photovoltaics																			
Batteries																			
Fuel cells																			
Catalysts																			
Nuclear																			
Solder																			
Electronic																			
Opto-electric																			
Grease, lubrication																			

^(a) Additives in, e.g., smelting, plating.

^(b) Includes indium tin oxide (ITO) layers on glass.



Annexe 1-6 Représentation des métaux sur les 3 premières dimensions de l'ACP. Source : calculs de l'auteur

2 Annexes au chapitre 2

2.1 Substitution des ressources naturelles par le capital

La démonstration de Victor (1991) a pour objectif d'invalider ou du moins de relativiser la substituabilité des ressources naturelles par le capital afin de maintenir perpétuellement la consommation par tête.

Si on suppose une fonction de production de type Cobb Douglas :

$$Y = K^a R^b L^c \quad a + b + c = 1 \quad (\text{A-2-1})$$

Où K, R, et L représentent les inputs en capital, ressources naturelles et travail et a, b et c leurs élasticités respectives.

Les modèles néo-hotellinien assure la pérennité de la consommation par tête grâce à la condition nécessaire et suffisante $a > b$.

Victor (1991) considère maintenant que le capital est produit à partir d'autres facteurs de production :

$$K = K^d R^e L^f \quad d + e + f = 1 \quad (\text{A-2-2})$$

Or en réinjectant (A-2-2) dans la fonction de production (A-2-1), il obtient :

$$Y = K^{ad} R^{(ae+b)} L^{(af+c)} \quad (\text{A-2-3})$$

La nouvelle condition nécessaire et suffisante est donc devenu $ad > ae+b$ ou $a(d-e) > b$. Comme d et e sont inférieurs à 1, nous en déduisons qu'il ne suffit pas que $a > b$.

Mais encore si on considère que K n'est qu'un moyen et non pas une source de la production et en résolvant K dans la seconde équation (A-2-2) puis en le réinjectant dans la première fonction de production (A-2-1) nous obtenons :

$$Y = R^{(ae/(1-d)+b)} L^{(af/(1-d)+c)} \quad (\text{A-2-4})$$

Faisant disparaître du même coup la possibilité d'une substitution des ressources naturelles par du capital.

2.2 *Limites inhérentes au recyclage*

Cette partie sur le recyclage s'inspire de Pearce et Turner (1990) et de l'ouvrage de McDonough et Braungart (2011) mais aussi en partie de la démonstration peu formalisée mais efficace de Grosse (2011). La vision du recyclage de Steinbach et Wellmer (2010) construite sur la minimisation du coût énergétique du recyclage fournit aussi une stratégie intéressante dans l'arbitrage entre production primaire et production secondaire.

On perçoit souvent le recyclage comme un levier efficace pour lutter à la fois contre l'épuisement d'une ressource naturelle et le réchauffement climatique. Si nous ne nions pas l'intérêt du recyclage d'un point de vue énergétique et environnemental (entre 65 et 95% de dépenses énergétiques en moins¹⁴⁹), le simple usage du recyclage comme solution universelle à l'épuisement suscite davantage d'interrogations. Tout d'abord avant de montrer la faiblesse de celui-ci dans l'état actuel de nos économies, il convient de préciser que le recyclage n'est pas possible pour l'ensemble des ressources énergétiques (hydrocarbures et uranium)

¹⁴⁹ Voir Norgate et Haque (2010).

dissipées après usage. La demande de métaux inclut également un ensemble d'usages dissipatifs (peinture, engrais, Graisse, pesticides, pharmaceutiques...) qui stérilisent définitivement ces ressources pour une future réutilisation.

Le recyclage peut prendre plusieurs formes et intervenir à plusieurs niveaux de la vie du produit. Tout d'abord la matière peut être recyclée au stade productif, les résidus sont alors encore relativement « purs » et peuvent faire l'objet d'un recyclage immédiat avec une réinjection dans le processus productif. On parle alors de « *new scraps* ». Une autre forme de recyclage consiste à récupérer la matière à l'issue de la vie du produit. On parle alors d'« *old scraps* ». Ce type de recyclage est plus difficile à mettre en œuvre car il nécessite une collecte souvent onéreuse en termes de temps, d'énergie et d'argent. Il faut ensuite reconditionner la matière, désassembler le produit et purifier les métaux. Parfois le métal visé est trop contaminé par d'autres métaux et substances ce qui le rend impropre à une consommation sous la même forme qu'auparavant. D'autres fois, le métal est présent en si faibles quantités ou mêlé si fortement à d'autres métaux (alliages) que le coût de sa récupération est prohibitif.

Ceci explique pourquoi il existe en réalité plusieurs formes de recyclage :

- Une réutilisation immédiate du produit en fin de vie ce qui permettra de ne pas faire appel à la production primaire de la ressource naturelle impliquée.
- La matière peut aussi être réintroduite directement dans le circuit de production du produit dont elle est elle-même issue. On parle alors de boucle de recyclage fermée, seule véritable possibilité d'une économie circulaire.
- D'une autre façon, la matière, si elle est trop dégradée et si elle ne remplit plus les conditions techniques du produit d'origine, peut servir d'input dans le procédé de production d'un produit moins exigeant. Ce type de recyclage est appelé sous-cyclage ou boucle de recyclage ouverte.
- Dans certaines situations la seule forme de recyclage employée passe par la combustion de la matière afin de récupérer son potentiel énergétique.

La première explication de la faiblesse du recyclage pour repousser perpétuellement l'épuisement d'une ressource est d'ordre physique. Le second principe de la thermodynamique empêche en effet un recyclage complet à 100% de la matière.

La seconde explication est une impossibilité mathématique. En effet, même en cas de recyclage complet de la matière, l'existence d'une croissance de la demande exprimée pour la

matière première en parallèle à un temps de passage dans l'économie avant sa récupération oblige à faire appel à une production primaire des mines pour compléter l'offre secondaire insuffisante. Le temps de passage dans l'économie d'une ressource naturelle explique aussi pourquoi il existe deux taux de recyclage. Un taux de recyclage apparent qui consiste à reporter la quantité de matière recyclée sur la demande totale de matière à l'année t , et un taux de recyclage réel calculant la part de matière recyclée sur la production dont elle est issue x années auparavant.

La demande pour une ressource épuisable en fonction du temps (M_t) peut être exprimée par :

$$M_t = M_t^p + M_t^s = M_0^e g^t \quad (\text{A-2-5})$$

Où M_t^p est la production primaire de la ressource, M_t^s l'offre secondaire de la ressource et M_0 la demande initiale. Le paramètre g exprime la croissance moyenne de la demande annuelle.

Etant donné d le paramètre exprimant la durée de temps de passage du produit dans l'économie et α la proportion de la matière recyclée (<1 selon la thermodynamique), l'offre secondaire peut être exprimée par :

$$M_t^s = \alpha M_{t-d} = M_0^e g^{(t-d)} \quad (\text{A-2-6})$$

On peut ensuite en déduire la part de l'offre secondaire dans l'offre totale de la ressource (β) :

$$\beta = \frac{M_t^s}{M_t} = \alpha e^{-gd} \quad (\text{A-2-7})$$

Au final, plus la croissance de la demande (g) est rapide et plus le temps de passage du produit dans l'économie est long (d) plus l'importance du recyclage dans la production total va décroître rapidement. On voit également que le niveau de recyclage de la matière en fin de vie (α) influence de manière relativement modérée la part de matière totale dans la demande totale de matière demandée.

Accentuer la durée de vie d'un produit peut donc paradoxalement accentuer la demande minière primaire d'une ressource naturelle du moins à moyen terme en repoussant dans le futur l'acquisition des flux de matières recyclés. Ce même effet tend à ralentir également l'assimilation du progrès technique venant avec une nouvelle génération de produit ce qui amoindrit la vitesse de réduction de l'intensité d'utilisation en matière première du produit. L'effet à long terme est quant à lui, plus incertain, car il faudrait également prendre en compte la baisse de la demande due à des cycles de vie du produit plus long.

3 Annexes au chapitre 3

3.1 Les différentes définitions autour des réserves et ressources

Le corpus principal permet de dégrossir les grandes notions employées dans les indicateurs géologiques. Les catégories diffèrent ensuite en fonction de la certitude géologique, la faisabilité économique et la faisabilité technique, mais le vocabulaire et les classes varient en fonction de la ressource étudiée et des pays considérés.

Ressources en place

Constituent la totalité des quantités de pétrole, gaz naturel, charbon ou autre minéral présent dans le sol. Ces ressources ne sont pas nécessairement recouvrables.

Réserves

Les réserves désignent la part techniquement et économiquement recouvrable des ressources en place.

Critères fonction de la technologie :

Ressources non conventionnelles

Ressources dont l'extraction nécessite des méthodes et des procédés technologiques sensiblement différents de ceux utilisés traditionnellement pour produire la ressource naturelle envisagée qui est donc appelée ressource conventionnelle. Ces nouvelles technologies impliquent souvent des coûts supplémentaires ou des modèles économiques originaux (sous produit, coproduit). Cette partition entre ressources conventionnelles et non conventionnelles évolue avec le temps.

Critères fonction de la certitude géologique :

Le milieu du pétrole à l'habitude de recourir à la séparation des trois P (prouvé, probable, possible). Nous nous appuyons sur l'ouvrage de Favennec (2009) pour reprendre ces définitions.

Les réserves prouvées

Les réserves prouvées représentent les quantités d'hydrocarbures que l'on estime pouvoir récupérer avec une certitude raisonnable dans les conditions économiques et technologiques du moment. Les réserves prouvées ont 9 chances sur 10 d'être produites.

Les réserves probables

Les réserves probables représentent les quantités additionnelles d'hydrocarbures que les informations géologiques et techniques du réservoir permettent d'envisager de récupérer. Les réserves probables ont 1 chance sur 2 d'être produites.

Les réserves possibles

Les réserves possibles sont une estimation des quantités d'hydrocarbures du réservoir qui ont une faible probabilité d'être produites (1 chance sur 10).

Une autre classification tirée de McKelvey (1972) appliquée aux ressources minérales est régulièrement évoquée dans la littérature liée aux ressources. Il faut garder en tête que cette classification ne tient pas compte de la faisabilité technique et économique et qu'elle s'appuie uniquement sur la certitude géologique des gisements. Les significations sont d'autant plus difficiles à comprendre que les correspondances entre les classes quand on passe de l'anglais au français ne sont pas identiques (voir tableau ci-dessous). L'USGS fournit également une pluralité de notions construites autour de la notion de réserves et de ressources¹⁵⁰.

Demonstrated				
Measured	Indicated	Inferred	Hypothetical	Speculative
Identified Resources			Undiscovered Resources	
Ressources identifiées			Ressources non découvertes	
Raisonnement assurées		Présumées	Pronostiquées	Spéculatives

Annexe 3-1 Correspondances entre les différentes notions de ressources. Adapté de l'OCDE-AEN

Critères fonction de la faisabilité économique :

Economic reserves

¹⁵⁰ Voir les définitions attachées à ces notions :

<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2014/mcsapp2014.pdf>.

This term implies that profitable extraction or production under defined investment assumptions has been established, analytically demonstrated, or assumed with reasonable certainty.

Marginal Reserves

That part of the reserve base which, at the time of determination, borders on being economically producible. Its essential characteristic is economic uncertainty. Included are resources that would be producible, given postulated changes in economic or technological factors.

Subeconomic Resources

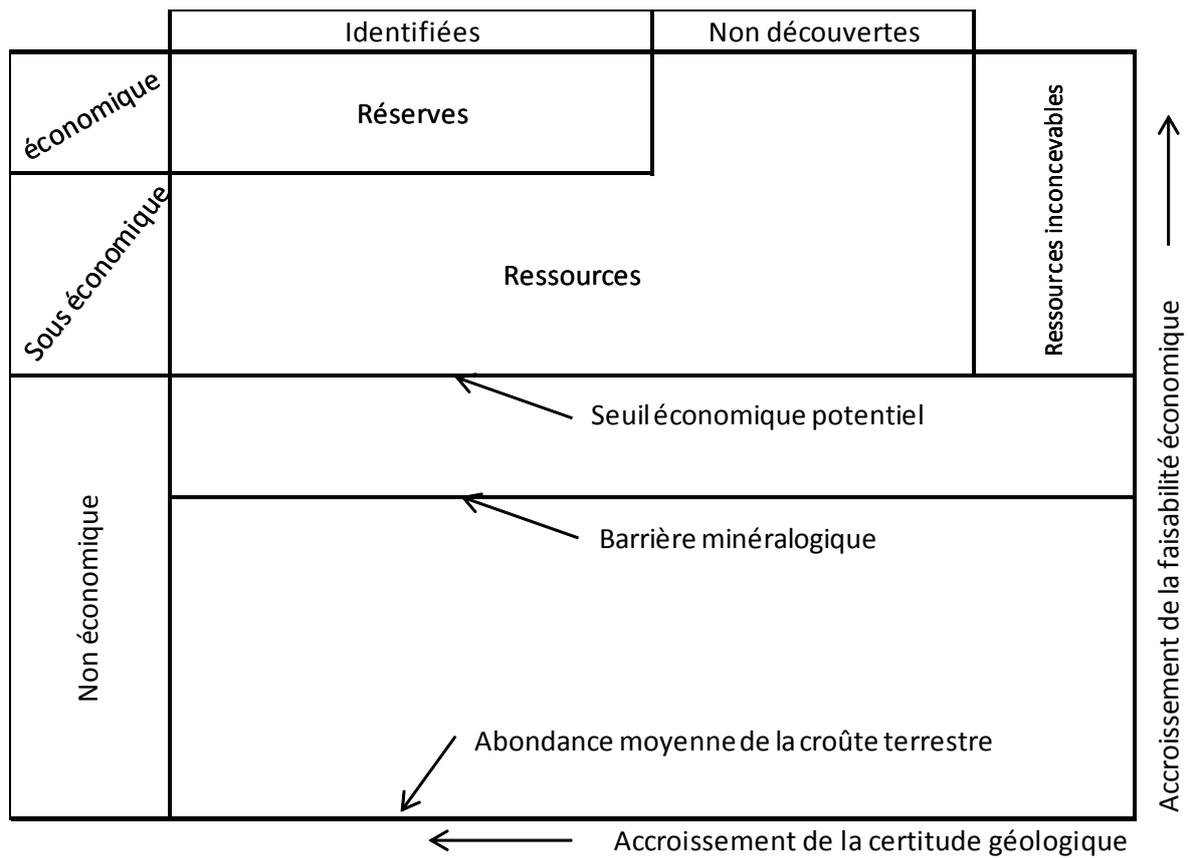
The part of identified resources that does not meet the economic criteria of reserves and marginal reserves.

Reserve Base

That part of an identified resource that meets specified minimum physical and chemical criteria related to current mining and production practices, including those for grade, quality, thickness, and depth. The reserve base includes those resources that are currently economic (reserves), marginally economic (marginal reserves), and some of those that are currently subeconomic (subeconomic resources).

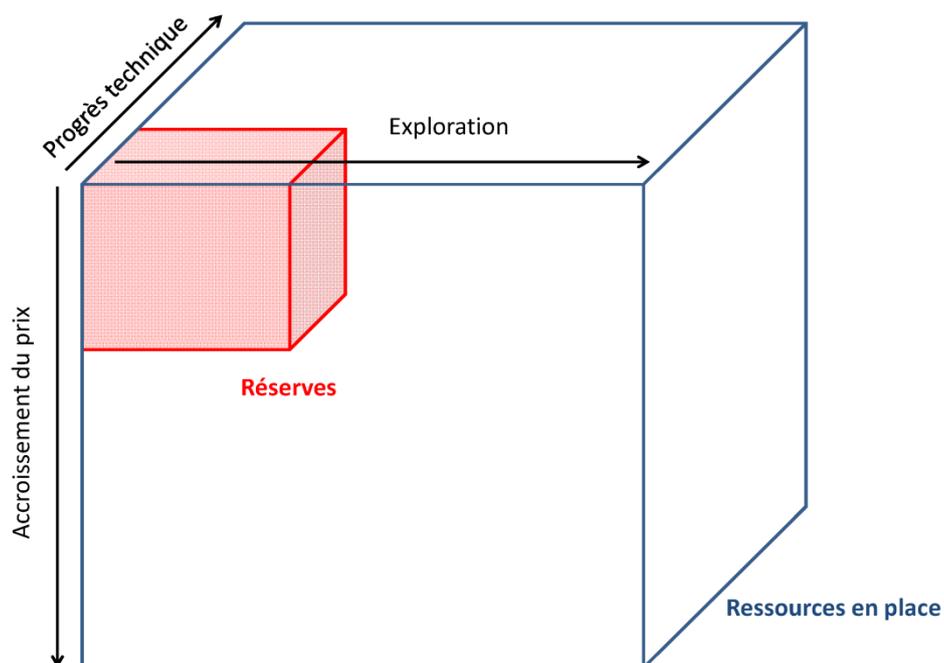
Représentations graphiques possibles des ensembles

Il existe plusieurs représentations possibles de l'ensemble de ces catégories, en voici quelques possibilités :



Annexe 3-2 Représentation graphique possible des réserves et ressources. Adapté de Brobst (1979)

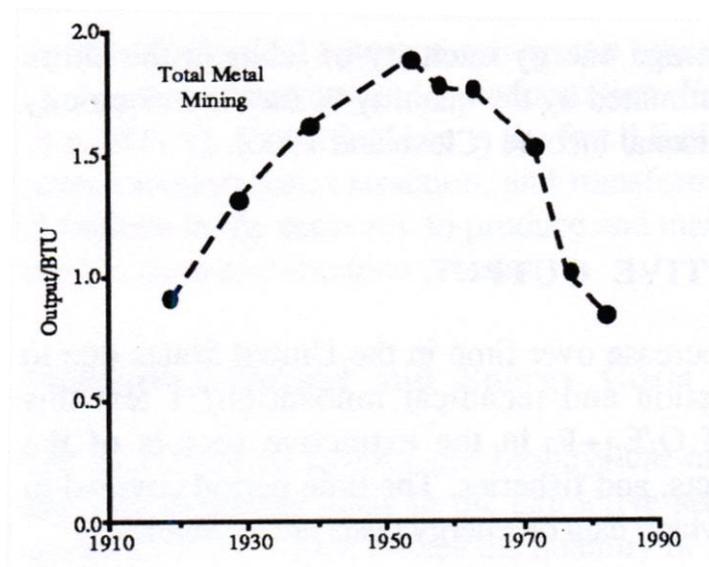
L'Annexe 3-2 représente les différentes catégories de réserves et de ressources telles que perçues par Brobst (1979). Cette représentation s'inspire à la fois de la vision de McKelvey (1972) et de celle de Skinner (1976).



Annexe 3-3 Représentation des réserves et des ressources en place. Source : auteur

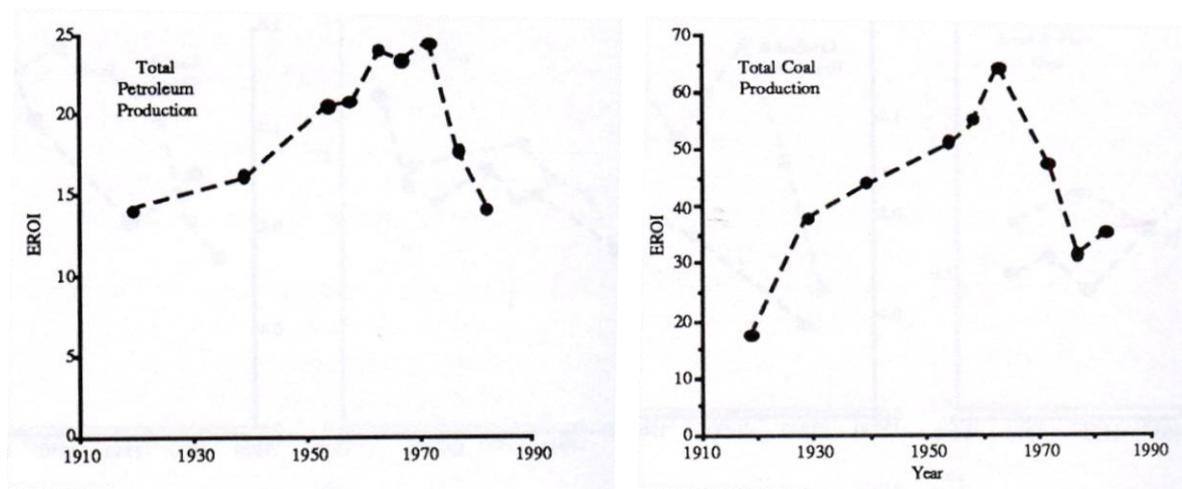
L'Annexe 3-3 souligne la nature géo-technico-économique des réserves. Un prix plus élevé nous permet d'accroître la quantité de ces réserves en intégrant des gisements connus mais non profitables actuellement. Ensuite davantage d'exploration mène (pas toujours) à un accroissement des réserves en découvrant des gisements dans des zones non explorées. Enfin, l'amélioration du progrès technique peut nous permettre d'atteindre des ressources jusqu'à là non envisagées (car sous une forme non traditionnelle) ou inaccessibles. Pour terminer les ressources en place délimitent la quantité totale et fixe de l'élément disponible sur terre.

3.2 Annexes relatives aux relations minerais – Energie

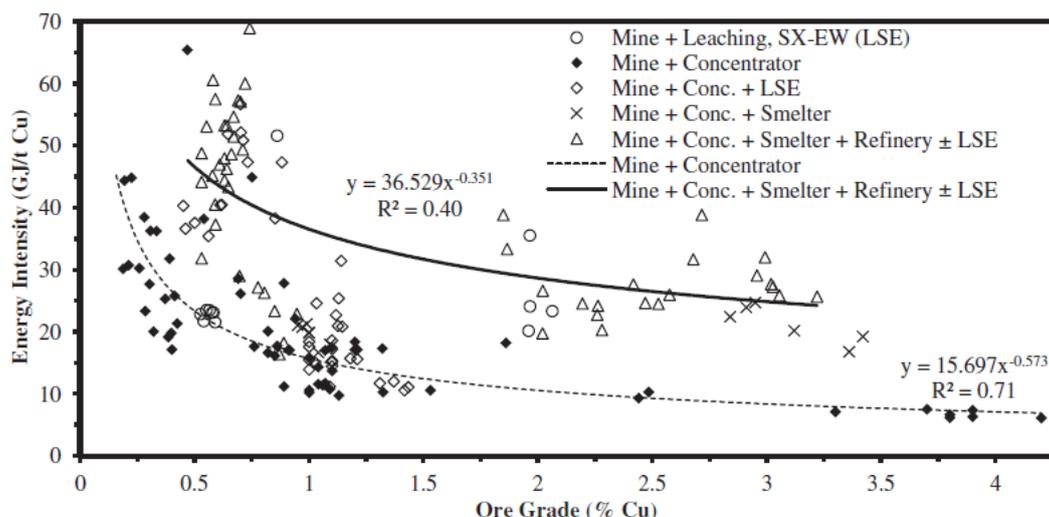


Annexe 3-4 Evolution de la quantité d'énergie requise par tonne de métal. Source : Cleveland (1991a, p. 300)

L'Annexe 3-4 montre l'évolution de la quantité de métaux produite avec la même quantité d'énergie au cours du temps. L'indicateur connaît une hausse progressive jusqu'au milieu des années 50 pour ensuite décliner continuellement jusqu'au début des années 90. Cela signifie qu'il a été progressivement plus facile d'extraire des métaux jusqu'en 1950 d'un point de vue énergétique puis que la tendance s'est renversée et qu'extraire la même quantité de métaux a réclamé de plus en plus d'énergie. Le même type d'évolution est observable pour le EROI du pétrole et du charbon mais avec des pics ayant lieu à des dates différentes (Annexe 3-5).



Annexe 3-5 Evolution de la quantité d'énergie requise par quantité d'énergie extraite (Pétrole et charbon). Source : Cleveland (1991a, p. 302)



Annexe 3-6 Relation entre consommation d'énergie par tonne de cuivre et concentration du minerai de cuivre.
Source : Northey et al. (2013, p.129)

Nous pouvons voir sur l'Annexe 3-6 ci-dessus qu'il existe une relation de type puissance entre la teneur des gisements en cuivre et la consommation énergétique unitaire pour extraire et concentrer une tonne de cuivre.

4 Annexes au chapitre 4

4.1 Evolution des conditions d'équilibre statistique d'un monopoleur produisant à la fois un produit primaire et un sous-produit.

La littérature économique autour de la production jointe de produits est assez abondante et s'est penchée sur des problèmes d'allocation des coûts communs et sur la production optimale de chacun des produits dans ces différentes allocations. La production jointe dans l'économie minière, économie des matières premières, implique non seulement des coûts communs mais aussi des relations contraintes entre produit primaire et sous-produit.

Le producteur d'un gisement minier a pour objectif l'extraction de deux types de métaux (a et s). Le métal a désignera un métal primaire et le métal s un sous-produit. En effet, lorsque le producteur extrait une tonne de minerai, il peut obtenir une plus grande quantité de métal a que de métal s et nous appellerons γ le rapport de production :

$$\frac{Q_a}{Q_s} = \gamma \quad (\text{A-4-1})$$

Où $\gamma > 1$

Cet état de la nature implique une contrainte de production de sorte que le producteur produit γ tonnes de a quand il produit seulement une tonne de s .

Le producteur fait aussi face à des demandes différentes, avec des consentements à payer pour une tonne de métal qui n'ont aucune raison d'être similaire pour a et s . Sans perte de généralités et compte tenu de la rareté du sous-produit et de l'abondance du produit primaire, la demande de s consent à payer un prix maximum plus élevé que la demande de a . Les élasticités prix des demandes peuvent aussi être différentes.

Soit la demande inverse de a :

$$P_a = \alpha Q_a + C_a \quad (\text{A-4-2})$$

Le signe de α est négatif car la demande décroît avec la hausse du prix. C_a représente le prix maximum qu'est prêt à payer le demandeur pour obtenir une infime quantité de a .

La demande inverse de s est construite de façon identique :

$$P_s = \beta Q_s + C_s \quad (\text{A-4-3})$$

On suppose que C_s est en théorie plus élevé que C_a du fait de la rareté du métal s , cette hypothèse n'est qu'une supposition et ne constitue pas un point d'appui du modèle.

Penchons nous tout d'abord sur le cas d'un producteur maximisant ses recettes en supposant en premier lieu que le coût est nul.

La maximisation du profit sous contrainte consiste donc à réaliser le lagrangien suivant :

$$\pi = P_a Q_a + P_s Q_s + \lambda(Q_a - \gamma Q_s) \quad (\text{A-4-4})$$

La première partie de l'expression représente les recettes du producteur tandis que la deuxième partie consiste à imposer la contrainte explicitée dans (A-4-1).

En remplaçant les prix de a et s par leur expression (A-4-2) et (A-4-3), nous obtenons la fonction de profit exprimée en fonction de Q_a et Q_s :

$$\pi = \alpha Q_a^2 + C_a Q_a + \beta Q_s^2 + C_s Q_s + \lambda(Q_a - \gamma Q_s) \quad (\text{A-4-5})$$

Les conditions d'optimalité de premier ordre sont garanties par l'annulation des dérivées premières de la fonction de profit.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \pi}{\partial Q_a} = 2\alpha Q_a + C_a + \lambda = 0 \\ \frac{\partial \pi}{\partial Q_s} = 2\beta Q_s + C_s - \gamma\lambda = 0 \\ \frac{\partial \pi}{\partial \lambda} = Q_a - \gamma Q_s = 0 \end{array} \right. \quad (\text{A-4-6})$$

La résolution de ce système d'équations nous permet d'obtenir les quantités optimales de a et de s tout en respectant la contrainte technique de la production.

$$Q_a^* = \frac{\gamma(-\gamma C_a - C_s)}{2(\beta + \gamma^2 \alpha)} \quad (\text{A-4-7})$$

$$Q_s^* = \frac{-\gamma C_a - C_s}{2(\beta + \gamma^2 \alpha)} \quad (\text{A-4-8})$$

Sur les quantités optimales, la contrainte est respectée puisque a est produit dans une quantité γ fois supérieure. Le dénominateur est toujours négatif puisque les nombres β et α sont toujours négatifs. Comme le numérateur est également toujours négatif, nous obtenons forcément des quantités optimales positives.

Tout d'abord comme nous le voyons dans les expressions (A-4-7) et (A-4-8), les quantités optimales de a et s dépendent chacune et conjointement de β et α . De la même manière le consentement maximal à payer pour a et s va à la fois influencer les quantités optimales de a et s . On remarque cependant que les offres de a et s ne réagissent pas identiquement à des variations des demandes a et s : l'offre du producteur va réagir γ fois plus à une variation des paramètres de la demande de a qu'à une variation des paramètres de s .

Une autre façon de percevoir cette réactivité consiste à augmenter le consentement maximum à payer des demandes de a et s . Ainsi l'expression (A-4-8) peut être vue comme une courbe d'offre exprimée en fonction du consentement à payer de la demande de s :

$$Q_s^* = \frac{-1}{2(\beta + \gamma^2 \alpha)} C_s + \frac{-\gamma C_a}{2(\beta + \gamma^2 \alpha)} \quad (\text{A-4-9})$$

Nous remarquons tout d'abord que l'offre de s réagit γ fois plus à une variation de C_a qu'à une variation de C_s , toutes choses égales par ailleurs. Toutefois, l'ampleur de la variation dépend du niveau relatif de C_s par rapport à C_a .

Intuitivement, le producteur ne réagira pas de la même manière si C_s est égal à C_a ou si C_s est γ fois supérieur à C_a . Dans la première situation, le producteur accordera moins d'importance à une variation de C_s sachant que la concentration de s est γ fois inférieure à a . A contrario, dans le second cas, bien que le producteur extrait γ fois moins de s , le consentement à payer de la demande de s est γ fois plus important que celui de la demande de a . Par conséquent, la production jointe devrait réagir de la même manière à une variation de même ampleur de C_a ou de C_s .

La situation multi produits avec coproduction réduit la sensibilité du producteur face à une variation du consentement maximum à payer de la demande d'un produit. Pour cela, il faut comparer l'équation (A-4-8) avec le résultat que nous aurions obtenu dans une situation de monopole à un produit sans coût dont le résultat est fourni ci-dessous :

$$Q_s^* = \frac{-C_s}{2\beta} \quad (\text{A-4-10})$$

Dans cette situation, la quantité optimale à produire varie de manière unitaire avec la hausse du consentement à payer maximum de la demande du produit s , ce qui n'est pas le cas dans une situation de coproduction.

Pour étudier les élasticités des offres jointes en fonction des prix des deux métaux, nous exprimons (A-4-2) et (A-4-3) en fonction de C_a et C_s et substituons ces expressions dans (A-4-8) pour obtenir :

$$Q_s^* = \frac{-\gamma P_a + \gamma \alpha Q_a - P_s}{\beta + 2\gamma^2 \alpha} \quad (\text{A-4-11})$$

Comme le dénominateur est toujours négatif dans cette expression, cela signifie que la quantité optimale de sous-produit réagit positivement au prix de a et de s mais aussi aux quantités produites de a (obligatoirement compte tenu de la contrainte de sous-produit).

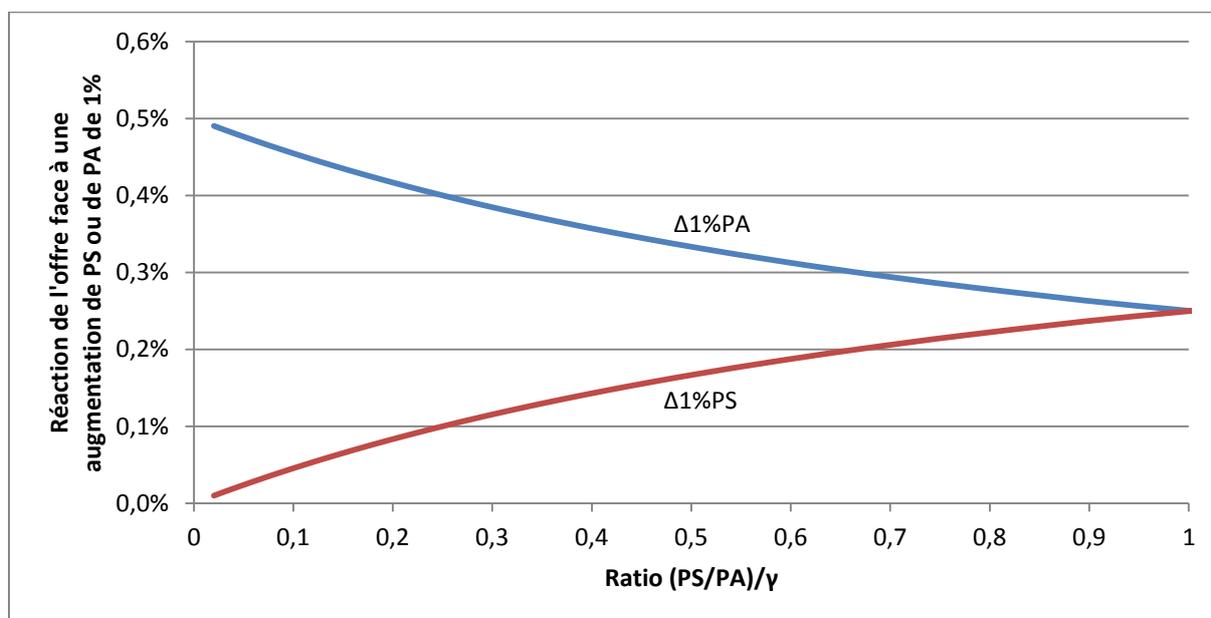
Si on s'intéresse à l'évolution de la réaction des offres jointes en fonction des prix des deux produits, il faut déterminer le niveau relatif de P_a par rapport à P_s en lien avec le rapport de concentration des deux métaux dans le gisement (γ). On peut l'exprimer sous la forme du

ratio qui représenterait la valorisation économique du métal en sous-produit relativement au produit primaire :

$$\text{Ratio de valorisation économique} = \frac{\frac{P_s}{P_a}}{\gamma} \quad (\text{A-4-12})$$

Quand ce ratio est inférieur à 1, le producteur s'intéresse moins à une augmentation du prix de s (P_s) qu'à un accroissement du prix de a (P_a). Quand le ratio est égal à 1, la production jointe varie de la même manière à une variation de 1% de P_s qu'à une variation de 1% de P_a .

Une application numérique consistant à fixer des valeurs quelconques pour C_a, C_s, α, β , et γ montre que quelles que soient les valeurs des élasticités des demandes de s et a , la convergence des réactivités de la production jointe par rapport aux prix de a et s a lieu lorsque le ratio est égal à 1. L'évolution de cette réactivité est illustrée par l'Annexe 4-13.



Annexe 4-13 Evolution de l'élasticité prix de l'offre jointe par rapport à une variation de 1% du prix du produit a et du produit s pour différents niveaux de ratio de valorisation. Source : *calculs auteur*

Considérons maintenant le coût de production. La fonction de coût total est définie par :

$$CT = \theta_1 Q_a^2 + \theta_2 Q_a + \theta_3 \quad (\text{A-4-14})$$

Cette fonction de coût est définie en fonction de la quantité de métal a produite car le coût est en général attribué à la fabrication du produit primaire. Cependant du fait de la production

jointe, et de la contrainte exprimée dans (A-4-4), attribuer le coût à a ou à s revient à octroyer un coût commun assuré par la production jointe.

L'interprétation économique de θ_3 est un coût fixe tandis que θ_1 et θ_2 sont des paramètres exprimant le coût variable de la fonction de coût. Nous aurions pu retenir une fonction de coût plus complexe, toutefois pour des raisons d'interprétation analytique, nous avons préféré nous limiter à un polynôme de degré deux. Néanmoins, la résolution reste possible pour des fonctions de coût total d'un degré supérieur¹⁵¹ et les conclusions du modèle demeurent identiques.

L'intégration de la fonction coût dans la fonction de profit (A-4-5), nous donne :

$$\pi = \alpha Q_a^2 + C_a Q_a + \beta Q_s^2 + C_s Q_s - (\theta_1 Q_a^2 + \theta_2 Q_a + \theta_3) + \lambda(Q_a - \gamma Q_s) \quad (\text{A-4-15})$$

Avec le réarrangement de cette fonction de profit, on obtient :

$$\pi = (\alpha - \theta_1) Q_a^2 + (C_a - \theta_2) Q_a + \beta Q_s^2 + C_s Q_s - \theta_3 + \lambda(Q_a - \gamma Q_s) \quad (\text{A-4-16})$$

En résolvant à nouveau le lagrangien, nous parvenons aux quantités optimales suivantes :

$$Q_a^* = \frac{\gamma(\gamma\theta_2 - \gamma C_a - C_s)}{2(\beta + \gamma^2\alpha - \gamma^2\theta_1)} \quad (\text{A-4-17})$$

$$Q_s^* = \frac{\gamma\theta_2 - \gamma C_a - C_s}{2(\beta + \gamma^2\alpha - \gamma^2\theta_1)} \quad (\text{A-4-18})$$

Les résultats de quantités optimales dans le cas où il n'y a pas de coût ($\theta_1, \theta_2, \theta_3 = 0$) sont identiques avec ceux trouvés dans les équations (A-4-7) et (A-4-8).

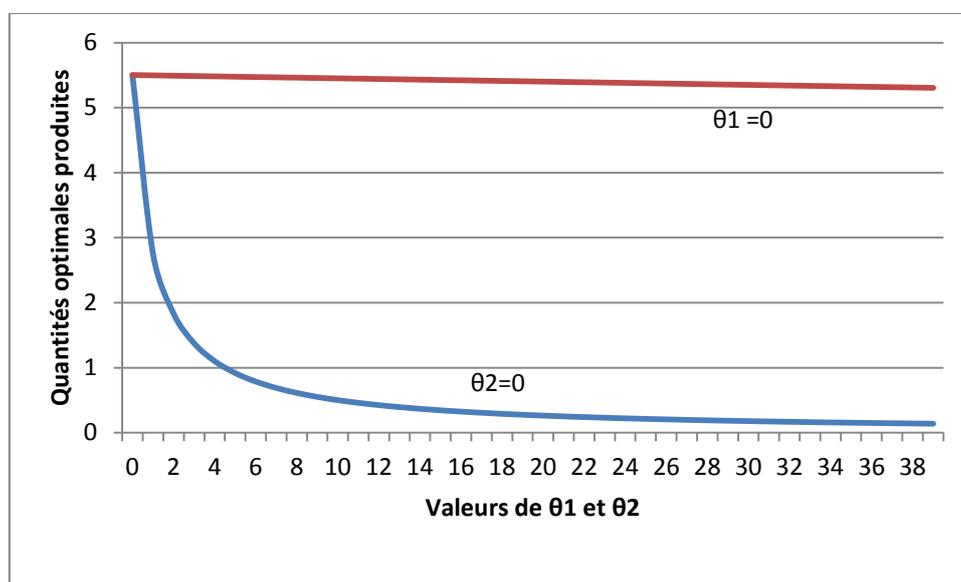
Dans le cas d'une fonction de coût strictement linéaire ($\theta_1 = 0$), les quantités optimales diminuent par rapport à leur niveau antérieur trouvé en (A-4-7) et (A-4-8).

Les quantités optimales s'annulent lorsque $\gamma\theta_2 = \gamma C_a + C_s$ soit $\theta_2 = C_a + \frac{C_s}{\gamma}$.

Autrement dit lorsque le coût variable d'extraction d'une tonne de minerai θ_2 dépasse le consentement maximum à payer pour les quantités de métal a et s présentes dans cette tonne de minerai (puisque $\gamma > 1$).

¹⁵¹ Notamment les fonctions de coût total d'un degré 3 intégrant des effets de rendements d'échelle croissants puis décroissants.

Dans le cas d'un coût total non linéaire dont la fonction serait un polynôme de degré 2, nous n'étudions que le cas où $\theta_1 > 0$ et $\theta_2 \geq 0$ ¹⁵². L'introduction de ces deux paramètres dans ces conditions ne peut que réduire les quantités optimales par rapport à la situation sans coût. En effet, si θ_1 augmente cela revient à augmenter le dénominateur donc à réduire les quantités produites. Nous avons calculé l'évolution des quantités optimales à produire suivant l'évolution de la valeur de θ_1 et θ_2 et représenté celle-ci sur l'Annexe 4-19. Le graphique montre que la quantité optimale à produire diminue quand θ_1 s'accroît (θ_2 constant et nul), de même que la producteur a tout intérêt à réduire sa production lorsque θ_2 augmente (θ_1 constant et nul).



Annexe 4-19 Evolution des quantités optimales suite à une augmentation des valeurs des paramètres de coûts θ_1 et de θ_2 . La courbe bleue représente l'impact d'un accroissement de θ_1 (avec des valeurs de θ_2 nulles) et la courbe rouge montre l'influence d'un accroissement de la valeur de θ_2 (avec des valeurs de θ_1 nulles). Source : *calculs auteur*

Finalement, les principales conclusions que nous pouvons tirer de ce modèle sont les suivantes : d'une part, le producteur de deux produits liés par une contrainte de sous-produit n'a pas intérêt à faire varier sa production de manière identique face à des variations similaires des prix de ces deux produits. En effet, cette réaction va dépendre essentiellement du rapport de concentration entre les deux produits et le rapport de leurs prix. Dans le cas des métaux, le producteur n'a pas forcément intérêt à accroître grandement sa production jointe si le prix d'un de ces sous-produits augmente fortement sous l'effet d'une demande en augmentation. Une trop forte augmentation de sa production jointe provoquerait en effet une

¹⁵² Dans la mesure où le coût total ne peut pas diminuer en fonction des quantités produites, θ_1 est strictement positif et θ_2 est supérieur ou égal à 0.

chute du prix des autres métaux produits dont les demandes n'auraient pas augmenté. La deuxième conclusion importante de ce modèle est de montrer la réduction de la sensibilité du producteur aux variations des prix de plusieurs de ses produits du fait de la coproduction ou sous-production en comparaison d'une situation mono-produit.

5 Annexes au chapitre 5

5.1 Le modèle de Dasgupta et Heal (1979) et extensions

Modèle intégrant une hypothèse de vue parfaite des agents

Le modèle de Dasgupta et Heal représente les équilibres temporels résultants de la croissance d'une économie avec une fonction de production de type :

$$Y_t = G(K_t, R_t, L_t, t) \quad (\text{A-5-1})$$

Avec Y le volume d'output produit par l'économie, K le volume de capital utilisé par l'économie, R la quantité de ressources naturelles nécessaire à la production et L la quantité de travail utilisé. A l'équilibre nous supposons que :

$$\frac{\partial G}{\partial K_t} = r_t; \quad \frac{\partial G}{\partial R_t} = P_t; \quad \frac{\partial G}{\partial L_t} = w_t \quad (\text{A-5-2})$$

Avec r le taux d'intérêt ou prix du capital, p le prix des ressources naturelles, et w le niveau de salaire.

La fonction de production est homogène de degré 1 :

$$G(K_t, R_t, L_t, t) = r_t K_t + p_t R_t + w_t L_t \quad (\text{A-5-3})$$

Une partie de la production peut être investie, et faire croître le capital :

$$I_t = \dot{K}_t = s Y_t = s G(K_t, R_t, L_t, t) \quad (\text{A-5-4})$$

Avec s le taux d'investissement tandis que le partie restante de la production peut être consommée :

$$C_t = (1 - s) G(K_t, R_t, L_t, t) \quad (\text{A-5-5})$$

Les agents gérant la ressource comme un actif s'attendent à ce que l'évolution des prix de la ressource soit égale au taux d'intérêt :

$$\frac{\dot{P}_t^e}{P_t} = r_t \quad (\text{A-5-6})$$

Cette équation est souvent connue sous le nom d'équation d'arbitrage.

Nous envisageons dans un premier cas, une vision parfaite du futur des agents économiques ce qui les conduits à ne pas faire d'erreur d'anticipation :

$$\frac{\dot{p}_t^e}{p_t} = \frac{\dot{p}_t}{p_t} \quad (\text{A-5-7})$$

La fonction de production prend la forme d'une fonction de Cobb Douglas avec progrès technique et rendements constants :

$$Y_t = G(K_t, R_t, L_t, t) = e^{(\lambda t)} K_t^{\alpha_1} R_t^{\alpha_2} L_t^{1 - \alpha_1 - \alpha_2} \quad (\text{A-5-8})$$

Avec $\lambda > 0$, $\alpha_1, \alpha_2, 1 - \alpha_1 - \alpha_2 > 0$

Nous obtenons à partir de cette équation et de (A-5-2), les élasticités du capital, des ressources naturelles et du travail par rapport à la production :

$$r_t \frac{K_t}{Y_t} = \alpha_1 \quad (\text{A-5-9})$$

$$p_t \frac{R_t}{Y_t} = \alpha_2 \quad (\text{A-5-10})$$

$$w_t \frac{L_t}{Y_t} = 1 - \alpha_1 - \alpha_2 \quad (\text{A-5-11})$$

Pour des raisons pratiques le volume de travail à été normalisé à 1.

Nous travaillerons avec deux variables exprimant la quantité de production par capital (x_t) et la quantité de ressources rapportée à son stock (y_t).

Notons également g_z le taux d'évolution d'une variable z soit :

$$g_z = \frac{\dot{z}_t}{z_t} \quad (\text{A-5-12})$$

Nous pouvons donc obtenir le taux d'évolution de x_t et y_t :

$$g_x = \frac{\dot{x}_t}{x_t} = \frac{\left(\frac{\dot{Y}_t}{K_t}\right)}{\frac{Y_t}{K_t}} = \frac{\dot{Y}_t}{Y_t} - \frac{\dot{K}_t}{K_t} = g_Y - g_k \quad (\text{A-5-13})$$

$$g_y = \frac{\dot{y}_t}{y_t} = \frac{\left(\frac{\dot{R}_t}{S_t}\right)}{\frac{R_t}{S_t}} = g_R - g_S = g_R + y_t \text{ car } g_S = \frac{\dot{S}_t}{S_t} = -\frac{R_t}{S_t} \quad (\text{A-5-14})$$

De la même manière, nous calculons le taux d'évolution du capital et de l'output :

$$g_k = \frac{\dot{K}_t}{K_t} \text{ or } \dot{K}_t = s Y_t \text{ donc } s \frac{Y_t}{K_t} = g_k = s x_t \quad (\text{A-5-15})$$

Une transformation logarithmique de la fonction de production nous permet d'obtenir :

$$g_Y = \lambda + \alpha_1 g_k + \alpha_2 g_R \quad (\text{A-5-16})$$

Autrement dit, la croissance de l'output dépend du progrès technique, de l'élasticité du capital multiplié par son taux d'évolution et de l'élasticité des ressources multiplié par leur taux d'évolution.

L'équation (A-5-17) est obtenue à partir de (A-5-10) et l'équation (A-5-18) à partir de (A-5-9) :

$$P_t = \frac{\alpha_2 Y_t}{R_t} \quad (\text{A-5-17})$$

$$r_t = \alpha_1 \frac{Y_t}{K_t} = \alpha_1 x_t \quad (\text{A-5-18})$$

Tandis que l'équation, (A-5-19) est obtenue à partir de (A-5-6), (A-5-7), (A-5-17) et (A-5-18):

$$\frac{\dot{p}_t^e}{p_t} = r_t = \frac{\dot{p}_t}{p_t} = \alpha_1 x_t = g_P = \frac{\left(\frac{\alpha_2 \dot{Y}_t}{R_t}\right)}{\frac{\alpha_2 Y_t}{R_t}} = \frac{\dot{Y}_t}{Y_t} - \frac{\dot{R}_t}{R_t} = g_Y - g_R \quad (\text{A-5-19})$$

Nous pouvons ensuite trouver la valeur de g_R et g_Y grâce à la résolution du système à deux équations et deux inconnues fournies par (A-5-15) combiné dans (A-5-16) et par (A-5-19) :

$$\begin{cases} g_Y = \lambda + \alpha_1(sx_t) + \alpha_2 g_R \\ g_Y - g_R = \alpha_1 x_t \end{cases} \quad (\text{A-5-20})$$

D'où :

$$g_R = \frac{\lambda - \alpha_1 x_t(1-s)}{1 - \alpha_2} \quad (\text{A-5-21})$$

Et :

$$g_Y = \frac{\lambda + \alpha_1 x_t(s - \alpha_2)}{1 - \alpha_2} \quad (\text{A-5-22})$$

Connaissant maintenant g_k , g_R et g_Y , nous pouvons obtenir g_x et g_y grâce à (A-5-13) et (A-5-14) :

$$g_x = \frac{\dot{x}_t}{x_t} = g_Y - g_k = \frac{\lambda + \alpha_1 x_t(s - \alpha_2)}{1 - \alpha_2} - sx_t \quad (\text{A-5-23})$$

$$\Leftrightarrow \dot{x}_t = x_t \left\{ \frac{\lambda}{1 - \alpha_2} + x_t \left[\frac{-\alpha_1 \alpha_2 + s(\alpha_1 + \alpha_2 - 1)}{1 - \alpha_2} \right] \right\} \quad (\text{A-5-24})$$

$$g_y = \frac{\dot{y}_t}{y_t} = g_R + y_t = \frac{\lambda - \alpha_1 x_t(1-s)}{1 - \alpha_2} + y_t \quad (\text{A-5-25})$$

$$\leftrightarrow \dot{y}_t = y_t \left\{ y_t - \frac{\alpha_1(1-s)}{1-\alpha_2} x_t + \frac{\lambda}{1-\alpha_2} \right\} \quad (\text{A-5-26})$$

Revenons sur la forme :

$$\dot{x}_t = x_t \left\{ \frac{\lambda}{1-\alpha_2} - x_t \left[\frac{\alpha_1\alpha_2 + s(-\alpha_1 - \alpha_2 + 1)}{1-\alpha_2} \right] \right\} \quad (\text{A-5-27})$$

Si $x_t = 0$ alors $\dot{x}_t = 0$ donc la valeur zéro pour la variable x_t entraîne la stationnarité de cette variable.

Si on suppose que $x_t > 0$ on s'intéresse à la valeur impliquant la stationnarité de x_t :

$$\frac{\lambda}{1-\alpha_2} = x_t \left[\frac{\alpha_1\alpha_2 + s(-\alpha_1 - \alpha_2 + 1)}{1-\alpha_2} \right] \quad (\text{A-5-28})$$

$$\dot{x}_t = 0 \leftrightarrow x_t = \frac{\lambda}{\alpha_1\alpha_2 + s(1 - \alpha_1 - \alpha_2)} \quad (\text{A-5-29})$$

Cette valeur de x_t est une valeur limite, lorsque x_t est inférieur à cette valeur, le valeur entre crochet est strictement positive ce qui fait croître la variable x_t . Au contraire, si x_t est supérieur à cette limite, la valeur entre crochet est strictement négative faisant décroître x_t jusqu'au point stationnaire établi impliqué par la valeur limite. Il y a donc convergence vers cette valeur.

Pour y_t la valeur particulière impliquant la stationnarité:

$$\dot{y}_t = 0 \leftrightarrow y_t = \frac{\alpha_1(1-s)}{1-\alpha_2} x_t - \frac{\lambda}{1-\alpha_2} \quad (\text{A-5-30})$$

Si y_t est inférieur à cette valeur la croissance de y_t sera négative et donc conduira à une valeur de y_t encore plus faible renforçant encore la décroissance et cela jusqu'à ce que y_t soit égal à 0. A l'opposé, une valeur supérieur à cette limite à priori implique une explosion du niveau et de la croissance de y_t . Les valeurs initiales de y_t ont donc tendance à diverger de cette limite si elles n'y sont pas strictement égales.

L'économie ne peut être initiée aux valeurs de n'importe quels couples (x_0, y_0) , nous pouvons déduire de l'équation (A-5-8) la forme générale de l'ensemble des couples initiaux possibles :

$$x_0 = \frac{Y_0}{K_0} = K_0^{\alpha_1-1} R_0^{\alpha_2} = K_0^{\alpha_1-1} S_0^{\alpha_2} y_0^{\alpha_2} \quad (\text{A-5-31})$$

Ce qui peut être reformulé sous la forme :

$$y_0 = x_0^{1/\alpha_2} K_0^{(1-\alpha_1)/\alpha_2} S_0^{-1} \quad (\text{A-5-32})$$

Hypothèse d'anticipation adaptative par les prix

Ici, nous supposons que agents ajustent leur anticipations en fonction des écarts de leur prévision avec la réalité l'équation remplace (A-5-33) alors l'équation (A-5-7) :

$$\dot{g}_p^e = \mu(g_p - g_p^e) \text{ avec } \mu > 0 \quad (\text{A-5-33})$$

Où :

$$g_p = \frac{\dot{P}_t}{P_t} \text{ et } g_p^e = \frac{\dot{P}_t^e}{P_t} \quad (\text{A-5-34})$$

En développant l'expression (A-5-33) grâce à (A-5-19) et (A-5-6) nous obtenons directement :

$$\dot{g}_p^e = \mu(g_Y - g_R - r_t) \quad (\text{A-5-35})$$

Il nous faut ensuite obtenir la valeur de \dot{g}_p^e grâce à (A-5-6) :

$$\dot{g}_p^e = \left(\frac{\dot{P}_t^e}{P_t} \right) = \dot{r}_t \quad (\text{A-5-36})$$

Or d'après (A-5-18), $r_t = \alpha_1 x_t$ donc :

$$\dot{g}_p^e = (\alpha_1 \dot{x}_t) = \alpha_1 \dot{x}_t = \alpha_1 \frac{\dot{x}_t}{x_t} x_t = \alpha_1 g_x x_t \quad (\text{A-5-37})$$

Ce qui nous donne la forme finale de (A-5-33) :

$$\dot{g}_p^e = \mu(g_Y - g_R - r_t) = \alpha_1 g_x x_t \quad (\text{A-5-38})$$

Nous pouvons ensuite établir la nouvelle forme de g_Y grâce à (A-5-13) et (A-5-38) :

$$g_Y = \frac{\mu r_t + \mu g_R - r_t g_k}{\mu - r_t} \quad (\text{A-5-39})$$

Ce qui nous permet de nous replacer dans la résolution d'un système similaire à (A-5-20) dans l'objectif d'obtenir g_Y et g_R :

$$\begin{cases} g_Y = \lambda + \alpha_1 g_k + \alpha_2 g_R \\ g_Y = \frac{\mu r_t + \mu g_R - r_t g_k}{\mu - r_t} \end{cases} \quad (\text{A-5-40})$$

D'où :

$$g_R = \frac{\lambda(\mu - r_t) - \mu r_t + g_k(\mu \alpha_1 - \alpha_1 r_t + r_t)}{-\mu \alpha_2 + \alpha_2 r_t + \mu} \quad (\text{A-5-41})$$

Et :

$$g_Y = \frac{\lambda \mu + \mu \alpha_1 g_k + \alpha_2 r_t g_k - \mu \alpha_2 r_t}{-\mu \alpha_2 + \alpha_2 r_t + \mu} \quad (\text{A-5-42})$$

Connaissant $g_Y, g_R, et g_k$ nous pouvons calculer les expressions de g_x et g_y dans le cadre d'anticipation adaptative :

$$g_x = \frac{\dot{x}_t}{x_t} = g_Y - g_k = \frac{\lambda + x_t[-\alpha_1 \alpha_2 + s(\alpha_1 + \alpha_2 - 1)]}{1 - \alpha_2 + \alpha_1 \alpha_2 x_t / \mu} \quad (\text{A-5-43})$$

$$\Leftrightarrow \dot{x}_t = x_t \left\{ \frac{\lambda + x_t[-\alpha_1 \alpha_2 + s(\alpha_1 + \alpha_2 - 1)]}{1 - \alpha_2 + \alpha_1 \alpha_2 x_t / \mu} \right\} \quad (\text{A-5-44})$$

$$g_y = \frac{\dot{y}_t}{y_t} = g_R + y_t = \frac{\lambda(1 - \alpha_1 x_t / \mu) - \alpha_1 x_t(1 - s) + [s \alpha_1 x_t^2(1 - \alpha_1)] / \mu}{1 - \alpha_2 + \alpha_1 \alpha_2 x_t / \mu} + y_t \quad (\text{A-5-45})$$

$$\Leftrightarrow \dot{y}_t = y_t \left\{ y_t + \frac{\lambda(1 - \alpha_1 x_t / \mu) - \alpha_1 x_t(1 - s) + [s \alpha_1 x_t^2(1 - \alpha_1)] / \mu}{1 - \alpha_2 + \alpha_1 \alpha_2 x_t / \mu} \right\} \quad (\text{A-5-46})$$

Remarquons que (A-5-44) tend vers (A-5-24) et que (A-5-46) tend vers (A-5-26) lorsque $\mu \rightarrow \infty$, c'est-à-dire lorsque la vitesse d'ajustement des anticipations des agents tend vers l'infini.

D'une manière similaire à l'équilibre précédent nous pouvons obtenir les valeurs limites impliquant la stationnarité des variables x_t et y_t :

$$\dot{x}_t = 0 \leftrightarrow x_t = \frac{\lambda}{\alpha_1 \alpha_2 + s(1 - \alpha_1 - \alpha_2)} \quad (\text{A-5-47})$$

$$\dot{y}_t = 0 \leftrightarrow y_t = \frac{\alpha_1 x_t (1 - s) - [s \alpha_1 x_t^2 (1 - \alpha_1)] / \mu - \lambda (1 - \alpha_1 x_t / \mu)}{1 - \alpha_2 + \alpha_1 \alpha_2 x_t / \mu} \quad (\text{A-5-48})$$

De manière similaire à (A-5-29) et (A-5-30), les limites exprimées en (A-5-47) et (A-5-48) sont des limites convergentes et divergentes respectivement.

Hypothèse d'anticipation adaptative par les quantités

Supposons cette fois-ci que les agents font évoluer leurs anticipations de prix en fonction des quantités de l'évolution de la consommation de ressources naturelles par rapport à leur stock, (A-5-49) remplace alors (A-5-7) :

$$\frac{\dot{g}_p^e}{g_p^e} = \mu \left(\frac{\dot{y}_t}{y_t} \right) \text{ avec } \mu > 0 \quad (\text{A-5-49})$$

En utilisant les résultats de (A-5-6) et de (A-5-18), nous pouvons déduire que :

$$\frac{\dot{g}_p^e}{g_p^e} = \frac{\dot{r}_t}{r_t} = \frac{\dot{x}_t}{x_t} \quad (\text{A-5-50})$$

Or d'après (A-5-13), (A-5-15) et (A-5-16) nous pouvons établir que :

$$g_x = \frac{\dot{x}_t}{x_t} = g_Y - g_k = \lambda + \alpha_1 g_k + \alpha_2 g_R - s x_t \quad (\text{A-5-51})$$

Ce qui nous permet à nouveau de nous replacer dans un système similaire à (A-5-20) grâce à (A-5-49) et (A-5-51) :

$$\begin{cases} g_x = \mu(g_y) = \mu(g_R + y_t) \\ g_x = \lambda + \alpha_1 g_k + \alpha_2 g_R - s x_t \end{cases} \quad (\text{A-5-52})$$

D'où :

$$g_R = \frac{\lambda - sx_t(1 - \alpha_1) - \mu y_t}{\mu - \alpha_2} \quad (\text{A-5-53})$$

On peut ensuite déterminer grâce à g_R et g_k la forme de g_x :

$$g_x = \lambda - sx_t(1 - \alpha_1) + \alpha_2 \left(\frac{\lambda - sx_t(1 - \alpha_1) - \mu y_t}{\mu - \alpha_2} \right) \quad (\text{A-5-54})$$

$$\Leftrightarrow \frac{\dot{x}_t}{x_t} = \mu \left(\frac{\lambda - sx_t(1 - \alpha_1) - \alpha_2 y_t}{\mu - \alpha_2} \right) \quad (\text{A-5-55})$$

$$\Leftrightarrow \dot{x}_t = x_t \left[\mu \left(\frac{\lambda - sx_t(1 - \alpha_1) - \alpha_2 y_t}{\mu - \alpha_2} \right) \right] \quad (\text{A-5-56})$$

Comme par hypothèse $x_t > 0$ et $\mu > 0$ il faut s'intéresser à l'expression de y_t pouvant annuler l'expression entre crochet :

$$\lambda - sx_t(1 - \alpha_1) - \alpha_2 y_t = 0 \quad (\text{A-5-57})$$

$$y_t = \frac{\lambda}{\alpha_2} - \frac{sx_t(1 - \alpha_1)}{\alpha_2} \quad (\text{A-5-58})$$

Si les deux valeurs de départ de y_t et x_t sont élevées, l'expression (A-5-56) est négative, ce qui implique une décroissance de la valeur de x_t et par ricochet de y_t du fait de leur liaison exprimée en (A-5-52). A l'inverse si les valeurs de y_t et x_t sont faibles, (A-5-56) est alors positive et fait croître les valeurs y_t et x_t jusqu'aux valeurs convergentes déduites de (A-5-58). Il y a donc dans cette situation une infinité de valeurs possibles d'équilibre.

Hypothèse d'anticipation adaptative par les prix et l'écart au taux d'intérêt du marché

Une autre voie possible non envisagée par Dasgupta et Heal, consiste à modéliser l'évolution des anticipations de prix des ressources naturelles par l'écart entre l'évolution du prix anticipé et l'évolution du prix de la ressource naturelle ainsi que l'écart entre l'évolution du prix observé et le taux d'intérêt du marché :

$$\dot{g}_p^e = \mu(g_p - g_p^e) + \beta(r_t - g_p) \text{ avec } \mu > 0 \text{ et } \beta \in \mathbb{R} \quad (\text{A-5-59})$$

La valeur de β peut prendre être supposée positive comme négative suivant qu'on estime que les anticipations sont régressives ou extrapolatives. Dans le cas où $\beta > 0$, on suppose qu'un taux d'intérêt du marché plus élevé (plus faible) que le taux de rendement observé d'une ressource naturelle va pousser les anticipations d'évolution du rendement de la ressource à la hausse (à la baisse). Au contraire dans le cas d'anticipations extrapolatives ($\beta < 0$), un taux d'intérêt plus élevé (plus faible) que le taux de rendement de la ressource va pousser les individus à vendre (à acheter) massivement leurs actifs en ressources naturelles faisant décroître (croître) son prix et accentuant de cette manière le déséquilibre entre le taux du marché et le taux de rendement de la ressource. Nous pouvons penser que les anticipations régressives représentent davantage les situations ordinaires tandis que les anticipations extrapolatives apparaissent probablement dans des contextes de paniques boursières et/ou économiques.

D'après (A-5-37) nous pouvons établir le résultat suivant :

$$\dot{g}_p^e = \mu(g_p - g_p^e) + \beta(r_t - g_p) = \alpha_1 g_x x_t \quad (\text{A-5-60})$$

En développant (A-5-60) dans la même logique que (A-5-39), nous pouvons obtenir la nouvelle forme de g_Y :

$$g_Y = \frac{g_R(\beta - \mu) + r_t(g_k + \beta - \mu)}{\beta - \mu + r_t} \quad (\text{A-5-61})$$

Il nous faut ensuite résoudre le système suivant :

$$\begin{cases} g_Y = \lambda + \alpha_1 g_k + \alpha_2 g_R \\ g_Y = \frac{g_R(\beta - \mu) + r_t(g_k + \beta - \mu)}{\beta - \mu + r_t} \end{cases} \quad (\text{A-5-62})$$

Afin d'obtenir les valeurs de g_Y et g_R :

$$g_R = \frac{\lambda(r_t + \beta - \mu) + g_k(\alpha_1 r_t + \alpha_1 \beta - \alpha_1 \mu - r_t) + r_t(\mu - \beta)}{\beta - \mu + \alpha_2(\mu - \beta - r_t)} \quad (\text{A-5-63})$$

$$g_Y = \frac{\lambda(\beta - \mu) + g_k[\alpha_1(\beta - \mu) - \alpha_2 r_t] + \alpha_2 r_t(\mu - \beta)}{\beta - \mu + \alpha_2(\mu - \beta - r_t)} \quad (\text{A-5-64})$$

Ces valeurs nous permettent de calculer les valeurs de g_x et g_y :

$$g_x = \frac{\lambda(\beta - \mu) + sx_t[\alpha_1\beta - \alpha_1\mu + \alpha_2\beta - \alpha_2\mu + \mu - \beta] + \alpha_1\alpha_2x_t(\mu - \beta)}{\beta - \mu + \alpha_2(\mu - \beta - \alpha_1x_t)} \quad (\text{A-5-65})$$

$$g_y = y_t + \frac{\lambda(\beta - \mu) + x_t[s\alpha_1\beta - s\alpha_1\mu - \alpha_1\beta + \alpha_1\mu + \alpha_1\lambda] + x_t^2(s\alpha_1^2 - s\alpha_1)}{\beta - \mu + \alpha_2(\mu - \beta - \alpha_1x_t)} \quad (\text{A-5-66})$$

Nous pouvons également remarquer que les expressions (A-5-65) et (A-5-66) sont identiques aux expressions (A-5-43) et (A-5-45) dès lors que l'on contraint β à la nullité et que l'on simplifie les numérateurs et les dénominateurs par μ . Ceci s'explique par l'égalité de (A-5-59) avec (A-5-33) lorsque $\beta = 0$.

La recherche des valeurs limites nous permet d'obtenir les valeurs suivantes :

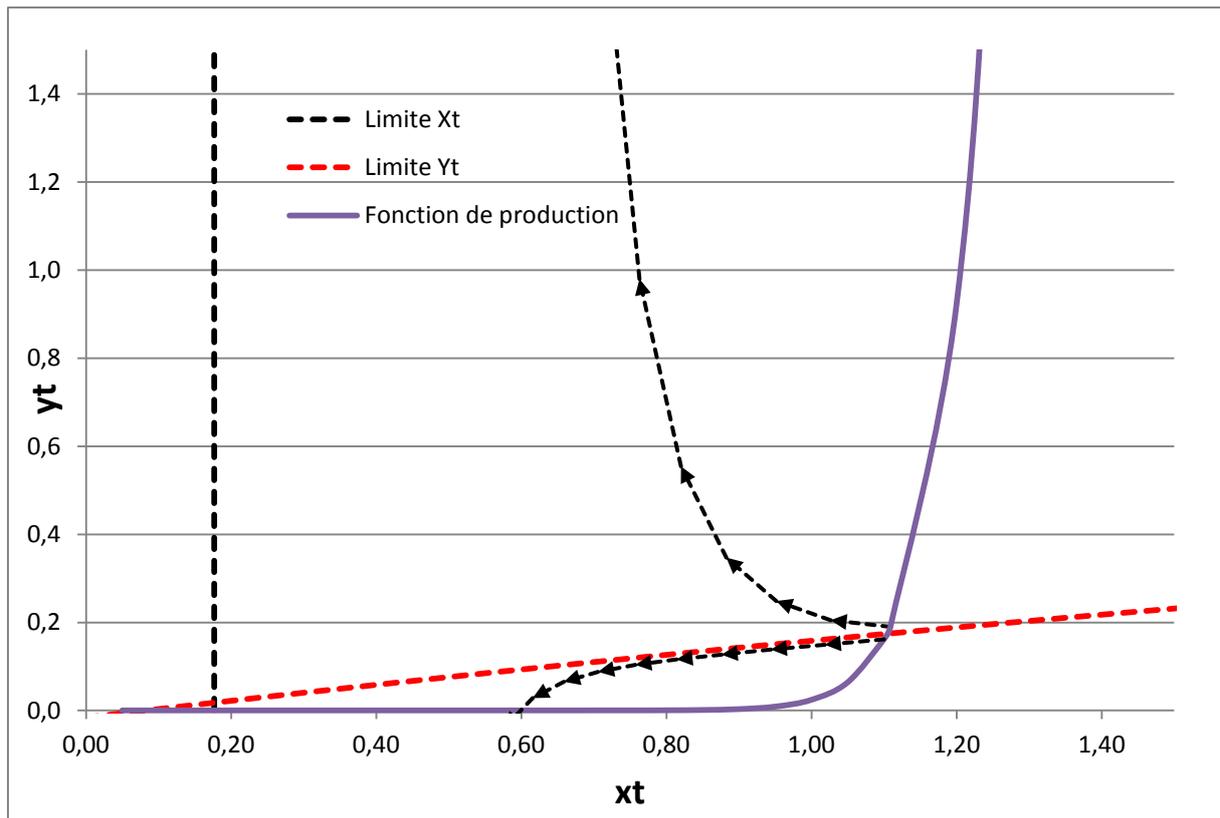
$$x_t = \frac{\lambda(\mu - \beta)}{s[\alpha_1\beta - \alpha_1\mu + \alpha_2\beta - \alpha_2\mu + \mu - \beta] + \alpha_1\alpha_2(\mu - \beta)} \quad (\text{A-5-67})$$

Cette limite est semblable à (A-5-29) et représente une limite convergente et stationnaire de la variable x_t . Des valeurs identiques pour μ et β implique une infinité de points stationnaires puisque la partie droite de l'équation (A-5-65) vaut systématique 0.

La valeur limite de y_t dépend également des valeurs prises par x_t :

$$y_t = \frac{\lambda(\mu - \beta) + x_t[-s\alpha_1\beta + s\alpha_1\mu + \alpha_1\beta - \alpha_1\mu - \alpha_1\lambda] + x_t^2(-s\alpha_1^2 + s\alpha_1)}{\beta - \mu + \alpha_2(\mu - \beta - \alpha_1x_t)} \quad (\text{A-5-68})$$

Cette limite est semblable à (A-5-30) et apparait comme une limite divergente dont seule la valeur exacte permet la stationnarité de y_t . Comme cette limite dépend des valeurs prises par x_t , elle évolue donc avec x_t . Le comportement du modèle est illustré par la figure ci-dessous.



Annexe 5-69 Diagramme illustrant le comportement du modèle. Source : *calculs de l'auteur*

Liste des notations :

Y_t : Output de l'économie.

L_t : Facteur travail.

K_t : Facteur capital.

R_t : Ressources naturelles.

S_t : Stock de ressources naturelles.

w_t : Salaire.

r_t : Taux d'intérêt et prix du capital.

P_t : Prix de la ressource naturelle.

P_t^e : Prix anticipé de la ressource naturelle.

λ : Progrès technique affectant la production.

s : Taux d'investissement.

I_t : Investissement.

C_t : Consommation.

α_1 : Elasticité du capital par rapport à la production.

α_2 : Elasticité des ressources naturelles par rapport à la production.

x_t : Rapport de l'output sur la quantité de capital.

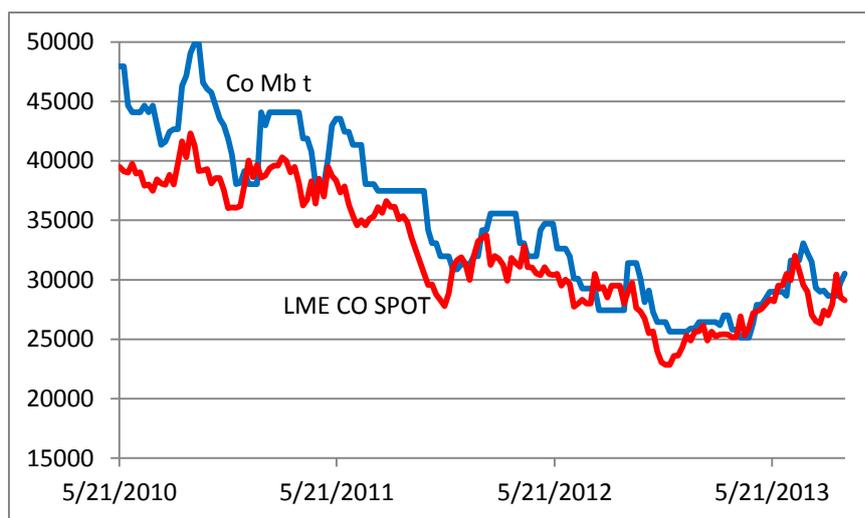
y_t : Rapport de la production des ressources naturelles sur leurs stocks.

$g_z\left(\frac{z_t}{z_t}\right)$: Taux de variation de la variable z_t .

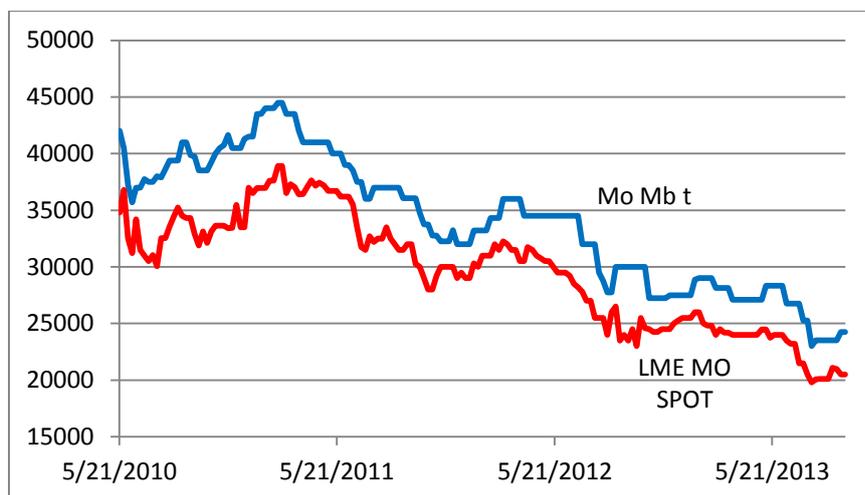
5.2 Annexes relatives au modèle économétrique du cobalt et du molybdène

Relation	Test sur la variable en niveau			Test sur la variable en Différence 1 ^{ère}			
	1	2	3	1	2	3	
Modèle							
Nickel LME spot	-1.565	-1.545	-0.783	-17.167***	-17.202***	-17.220***	I(1)
Nickel LME 3mois	-1.571	-1.552	-0.786	-17.151***	-17.185***	-17.204***	I(1)
Nickel comptant reporté	-1.792	-1.765	-0.693	-16.809***	-16.841***	-16.861***	I(1)
Molybdène LME spot	-2.542	-0.191	-1.617*	-16.220***	-16.198***	-15.942***	I(1)
Molybdène LME 3mois	-2.724	-0.446	-1.574	-16.921***	-16.888***	-16.567***	I(1)
Molybdène comptant reporté	-2.709	-2.724	-1.016	-11.052***	-11.050***	-11.012***	I(1)
Cobalt LME spot	-2.636	-1.453	-0.786	-14.102***	-14.133***	-14.092***	I(1)
Cobalt LME 3 mois	-3.005	-1.444	-0.741	-14.516***	-14.549***	-14.523***	I(1)
Cobalt comptant reporté	-3.847**	-3.378**	-1.115	-12.985***	-12.973***	-12.959***	I(1)

Annexe 5-70 Tests de stationnarité (Phillips-Perron) sur les logs des prix. Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%.
Source : calculs de l'auteur



Annexe 5-71 Evolution du prix du cobalt spot et reporté. Source : Metal bulletin et LME



Annexe 5-72 Evolution du prix du molybdène spot et reporté. Source : Metal bulletin et LME

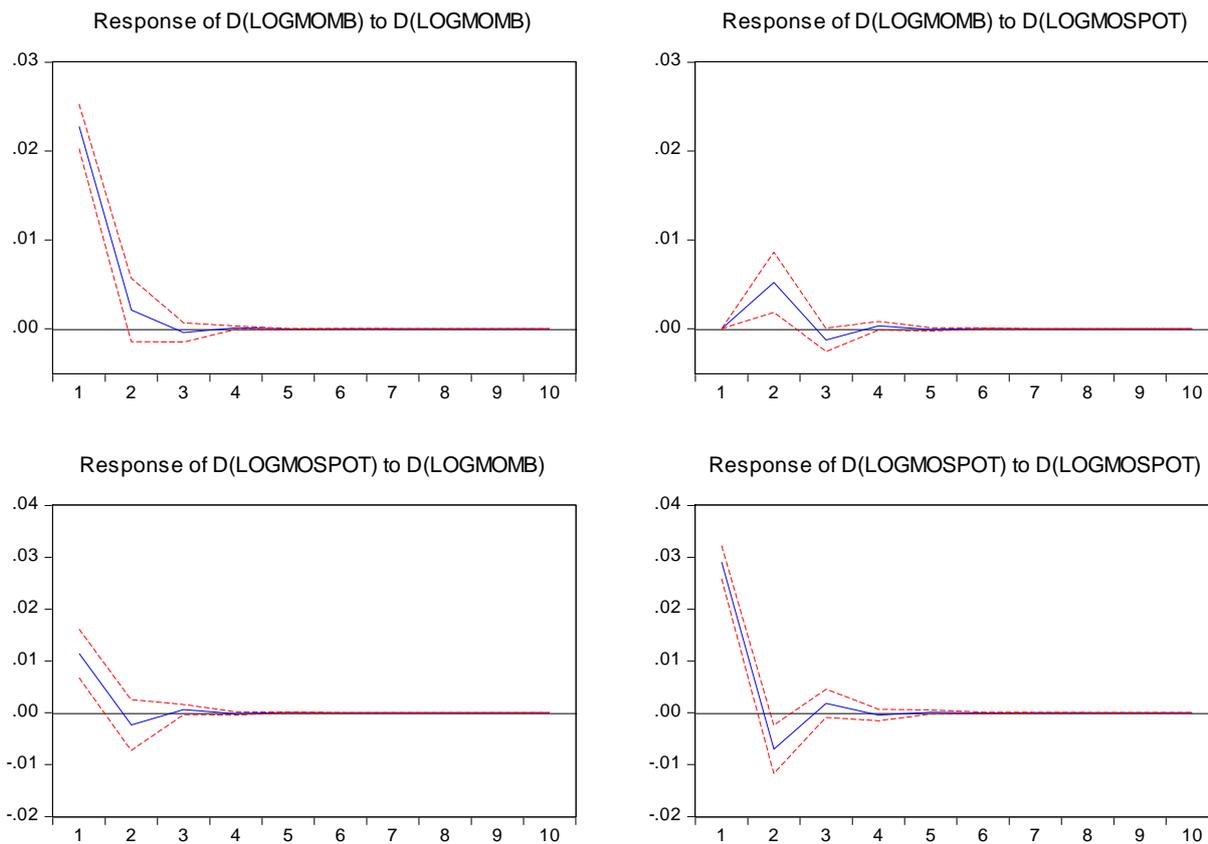
Test de cointégration			
	Eigenvalue	Trace Statistic	Prob.
Test de la trace			
None	0.105737	18.33072**	0.0182
At most 1	1.75E-05	0.002873	0.9558
Test de la valeur propre maximale			
	Eigenvalue	Max-Eigen Statistic	Prob.
None	0.105737	18.32785**	0.0108
At most 1	1.75E-05	0.002873	0.9558

Annexe 5-73 Test de cointégration de Johansen entre le prix spot du molybdène et le prix reporté du molybdène avec un retard (SCH). Source : calculs de l'auteur

Cointegrating Eq:		CointEq1	
LOGMOMB(-1)	1.000000		
LOGMOSPOT(-1)	-0.982234***		
	(0.05864)		
C	-0.323152		
Error Correction:	D(LOGMOMB)	D(LOGMOSPOT)	
CointEq1	-0.117575***	0.076383	
	(0.04458)	(0.06267)	
D(LOGMOMB(-1))	0.060964	0.084361	
	(0.07502)	(0.10546)	
D(LOGMOSPOT(-1))	0.072220	-0.217805***	
	(0.05761)	(0.08099)	
C	-0.002001	-0.003572	
	(0.00165)	(0.00232)	
Dummie1	-0.084899***	-0.011804	
	(0.02075)	(0.02917)	
Dummie2	-0.080644***	-0.046303	
	(0.02081)	(0.02925)	
Dummie3	-0.006261	-0.117614***	
	(0.02145)	(0.03015)	
Dummie4	0.014020	0.095850***	
	(0.02088)	(0.02936)	
R-squared	0.260837	0.220414	
F-statistic	7.864221***	6.300883***	
Portemanteau tests	Q-stat	P-value	
Lag 2	4.293752	0.6370	
Lag 3	5.867439	0.8263	
White test	Joint test	P-value	
Chi-square	35.55358	0.2231	

Annexe 5-74 Estimation du modèle VECM entre le prix spot du molybdène et le prix reporté du molybdène, Ecart-type : (). Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : *calculs de l'auteur*

Response to Cholesky One S.D. Innovations ± 2 S.E.



Annexe 5-75 Réponse d'impulsion entre le prix reporté du molybdène et le prix spot du molybdène, Ecart type : ligne rouge. $k=1$. Source : *calculs de l'auteur*

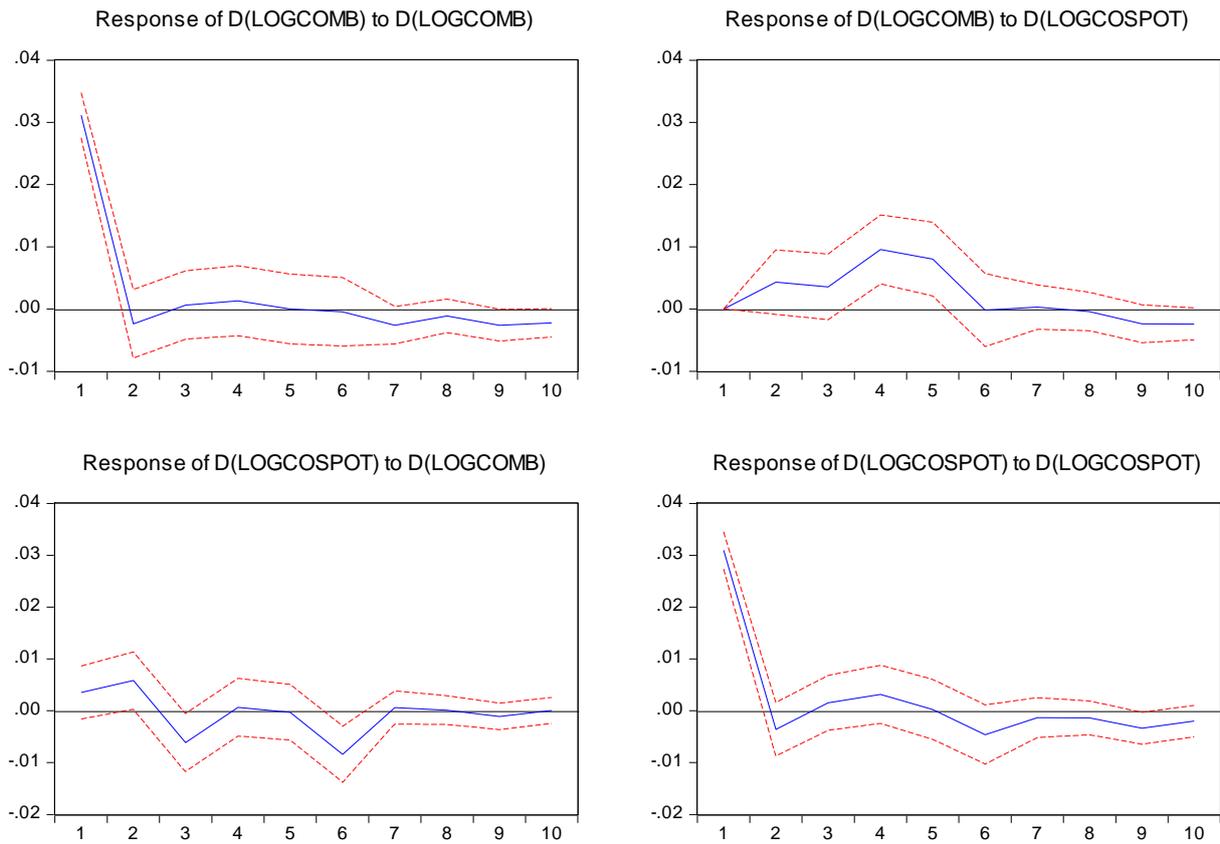
Test de cointégration			
	Eigenvalue	Trace Statistic	Prob.
Test de la trace			
None	0.127165	20.84298***	0.0071
At most 1	0.004811	0.713681	0.3982
Test de la valeur propre maximale			
	Eigenvalue	Max-Eigen Statistic	Prob.
None	0.127165	20.12930***	0.0053
At most 1	0.004811	0.713681	0.3982

Annexe 5-76 Test de cointégration de Johansen entre le prix spot du cobalt et le prix reporté du cobalt avec 5 retards (AIC). Source : *calculs de l'auteur*

Cointegrating Eq:	CointEq1	
LOGCOMB(-1)	1.000000	
LOGCOSPOT(-1)	-1.144679***	
	(0.07420)	
C	1.425012	
Error Correction:	D(LOGCOMB)	D(LOGCOSPOT)
CointEq1	-0.171171***	0.055760
	(0.05971)	(0.07122)
D(LOGCOMB(-1))	0.010890	0.166036*
	(0.08037)	(0.09586)
D(LOGCOMB(-2))	0.039793	-0.187865**
	(0.07802)	(0.09305)
D(LOGCOMB(-3))	0.093212	-0.050847
	(0.07614)	(0.09080)
D(LOGCOMB(-4))	-0.036248	-0.044578
	(0.07139)	(0.08514)
D(LOGCOMB(-5))	0.006659	-0.233281***
	(0.06945)	(0.08283)
D(LOGCOSPOT(-1))	0.004247	-0.044549
	(0.09389)	(0.11198)
D(LOGCOSPOT(-2))	0.009749	0.055967
	(0.09014)	(0.10750)
D(LOGCOSPOT(-3))	0.123775	0.164262
	(0.09019)	(0.10756)
D(LOGCOSPOT(-4))	0.073188	0.036384
	(0.09191)	(0.10961)
D(LOGCOSPOT(-5))	-0.040323	-0.108072
	(0.08587)	(0.10241)
C	-0.004755**	-0.003051
	(0.00226)	(0.00269)
DUM8	0.123153***	0.035464
	(0.02771)	(0.03305)
DUM9	0.121214***	-0.022555
	(0.02756)	(0.03287)
R-squared	0.436005	0.185360
F-statistic	7.968518	2.345377
Portemanteau tests	Q-stat	P-value
Lag 6	6.671305	0.3523
Lag 7	8.304669	0.5991
White test	Joint test	P-value
Chi-square	73.06844	0.4427

Annexe 5-77 Estimation du modèle VECM entre le prix spot du cobalt et le prix reporté du cobalt, Ecart-type : ().
Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%. Source : données LME

Response to Cholesky One S.D. Innovations ± 2 S.E.



Annexe 5-78 Réponse d'impulsion entre le prix reporté du cobalt et le prix spot du cobalt, Ecart type : ligne rouge. $k=1$. Source : calculs de l'auteur



Annexe 5-79 Evolution du prix comptant et futures du cobalt. Source : données LME



Annexe 5-80 Evolution du prix comptant et futures du molybdène. Source : données LME

Test de cointégration			
	Eigenvalue	Trace Statistic	Prob.
Test de la trace			
None	0.038893	6.657739	0.6177
At most 1	0.000926	0.151976	0.6966
Test de la valeur propre maximale			
	Eigenvalue	Max-Eigen Statistic	Prob.
None	0.038893	6.505763	0.5492
At most 1	0.000926	0.151976	0.6966

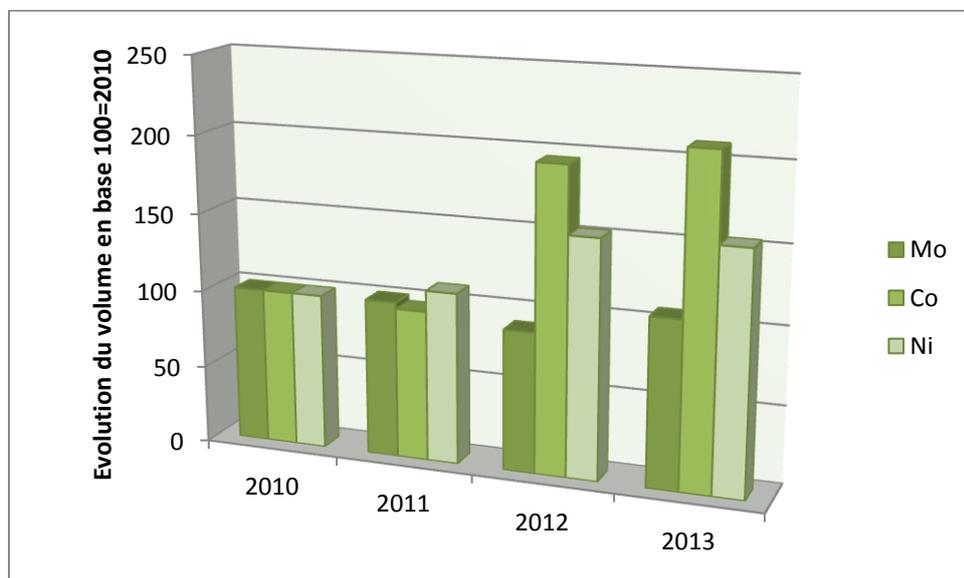
Annexe 5-81 Test de cointégration de Johansen entre le prix comptant du molybdène et le prix futures du molybdène avec un retard. Source : calculs de l'auteur

Test de cointégration			
	Eigenvalue	Trace Statistic	Prob.
Test de la trace			
None	0.134387	25.85131***	0.0010
At most 1	0.013225	2.183347	0.1395
Test de la valeur propre maximale			
	Eigenvalue	Max-Eigen Statistic	Prob.
None	0.134387	23.66796***	0.0013
At most 1	0.013225	2.183347	0.1395

Annexe 5-82 Test de cointégration de Johansen entre le prix spot du cobalt et le prix futures du cobalt avec un retard. Source : calculs de l'auteur

Cointegrating Eq:	CointEq1	Colonne1
LOGCOSPOT(-1)	1.000000	
LOGCOFU(-1)	-1.039727***	
	(0.00636)	
C	0.407235	
Error Correction:	D(LOGCOSPOT)	D(LOGCOFU)
CointEq1	0.528164	0.827945*
	(0.50647)	(0.49626)
D(LOGCOSPOT(-1))	-0.008850	0.051177
	(0.61985)	(0.60735)
D(LOGCOFU(-1))	-0.096285	-0.166616
	(0.62848)	(0.61581)
C	-0.002405	-0.002356
	(0.00249)	(0.00244)
R-squared	0.020317	0.037272
F-statistic	1.106017	2.064807**

Annexe 5-83 Estimation du modèle VECM entre le prix spot du cobalt et le prix futures du cobalt, Ecart-type : ().
Seuil de risque : *10%, **5%, ***1%



Annexe 5-84 Evolution du volume annuel en base 100=2010 pour le Molybdène, le Cobalt et le Nickel. Source : LME

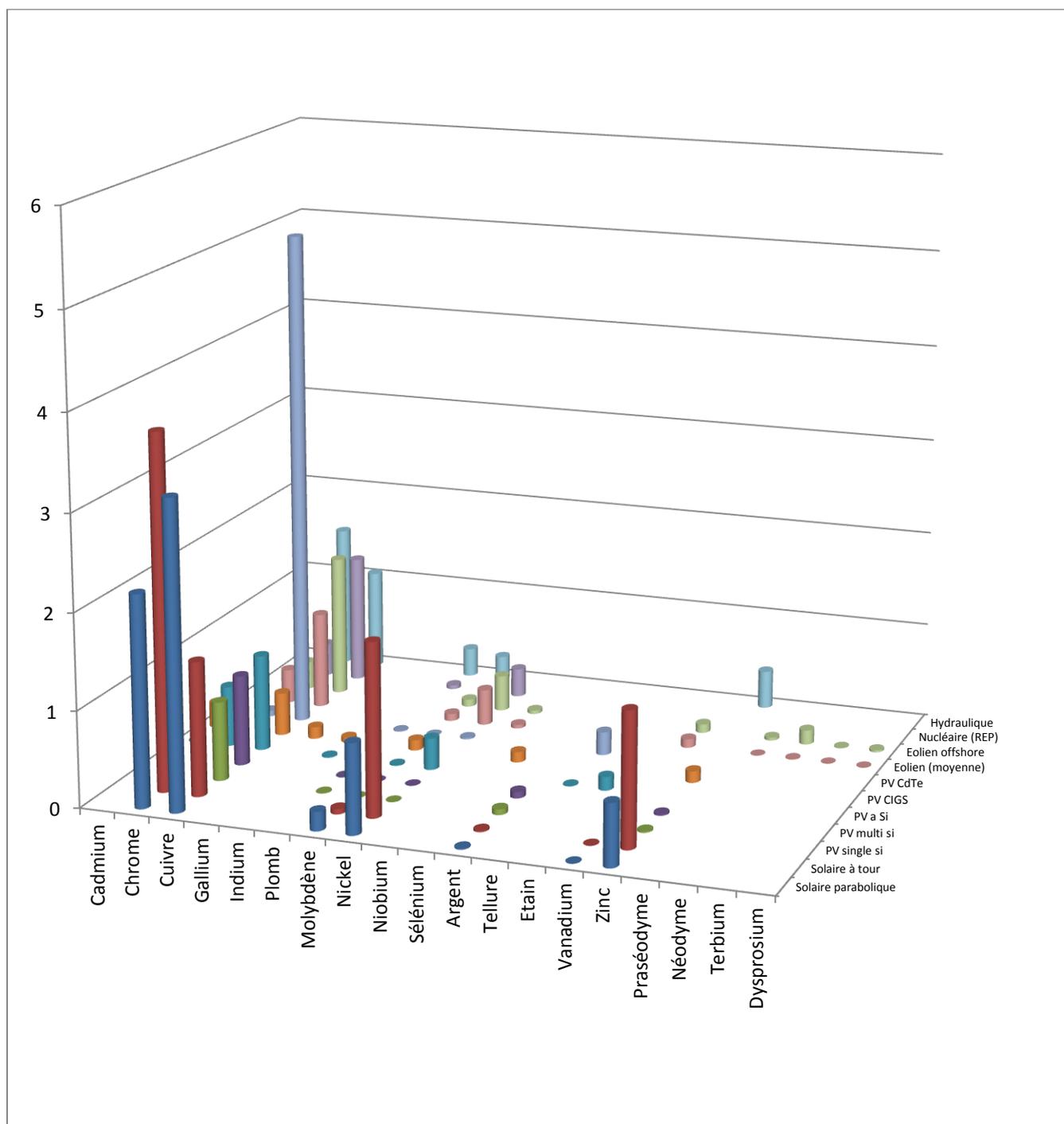
6 Annexes au chapitre 6

6.1 Calculs détaillés et représentations graphiques complémentaires

Métal	GJ/t	Production 2012 (t)	GJ	%
Acier	22,7	1 500 000 000	34 050 000 000	6,519%
Aluminium	211,51	44 400 000	9 391 044 000	1,798%
Cuivre (pyro)	33,02	17 000 000	449 072 000	0,086%
Cuivre (hydro)	64,46	17 000 000	219 164 000	0,042%
Plomb	19,57	5 200 000	90 569 960	0,017%
Plomb (ISP)	32,51	5 200 000	18 595 720	0,004%
Nickel (pyro)	113,52	2 100 000	143 035 200	0,027%
Nickel (hydro)	193,77	2 100 000	162 766 800	0,031%
Zinc (electrolytic)	48,44	13 000 000	566 748 000	0,109%
Zinc (ISP)	35,85	13 000 000	46 605 000	0,009%
Argent	1710	24 000	41 040 000	0,008%
Or	68400	2 700	184 680 000	0,035%
Etain	221	230 000	50 830 000	0,010%
Titane	47,5	190 000	9 016 318	0,002%
Tellure	77,4	500	38 686	0,000%
Molybdène	79,4	250 000	19 858 596	0,004%
Antimoine	133,1	180 000	23 954 109	0,005%
Cobalt	85,6	110 000	9 418 648	0,002%
Lithium	217,7	37 000	8 053 821	0,002%
Chrome	276,5	24 000 000	6 635 350 142	1,270%
Néodyme	398,2	21 080	8 394 131	0,002%
Indium	1588,7	600	953 213	0,000%
Gallium	2114,8	200	422 962	0,000%
Tantale	2682,2	765	2 051 883	0,000%
PGM	210500	379	79 779 500	0,015%
Total métaux 2012 (GJ)			52211442690	9,996%
Total énergie primaire 2012 (GJ)			5,22345E+11	100%

Annexe 6-1 Calculs détaillés relatifs à la consommation énergétique mondiale des métaux. Source : Valero et Botero (2002), Glaister et Mudd (2010), Rankin (2011), Schmidt (2012), Singh (2011), Tharumarajaha et Koltunb (2011), USGS, calculs de l'auteur.

6.2 Intensité en métaux de différentes énergies renouvelables



Annexe 6-2 Intensités en différents métaux d'un certain nombre de technologies vertes (kg par MW). Source : Données de Pihl et al. (2012), Ecoinvent, Chiffres internes EDF et calculs de l'auteur

L'Annexe 6-2 montre les quantités (kg) requises de métaux par MW de puissance installée et cela pour différents systèmes énergétiques isolés. De manière générale, nous pouvons observer que les systèmes énergétiques consomment davantage de métaux de base que de métaux rares. Il apparaît également que certains métaux sont indispensables (comme le cuivre

ou le chrome) alors que d'autres métaux semblent plutôt spécifiques à certaines technologies (comme l'indium ou l'argent).

Table des matières

Table des figures	8
Table des tableaux	13
Table des notations.....	16
INTRODUCTION GENERALE.....	18
PARTIE I - COMPREHENSION DE LA DISPONIBILITE ECONOMIQUE DE LONG TERME DES METAUX RARES.....	25
CHAPITRE 1 : FONDEMENTS ECONOMIQUES DES METAUX RARES ET ROLES JOUES DANS LES NOUVELLES TECHNOLOGIES DE L'ENERGIE	27
1 Introduction	27
2 Les typologies existantes	28
2.1 Les typologies de nature physico-chimique	28
2.2 Les typologies de nature géologique	30
2.3 Les typologies de nature économique	31
2.4 Les typologies de nature stratégique	34
2.5 Conclusion sur les typologies disponibles	35
3 Evaluation d'une typologie économique via l'ACP et le CAH.....	35
3.1 Les critères pour une nouvelle classification économique des métaux.....	35
3.2 Les données	37
3.3 La méthode l'Analyse en Composantes Principales	40
3.4 Transformation des données et analyse des résultats	40
3.5 Détermination de classes par la classification ascendante hiérarchique	47
4 Fondamentaux économiques sous jacents	52
4.1 Sous jacents économiques des différentes classes de métaux.....	52
4.2 Perspectives de recherches	55
5 Implication des métaux rares dans les nouvelles technologies de l'énergie.....	56

5.1	Le rôle des métaux rares dans les technologies amont de l'énergie.....	57
5.2	L'intégration des métaux rares dans les technologies aval de l'énergie	59
6	Conclusion	62

CHAPITRE 2 : LA THEORIE DE L'EPUISEMENT DES RESSOURCES NATURELLES : UNE PERSPECTIVE INTERDISCIPLINAIRE

1	Introduction	64
1.1	L'importance des ressources naturelles.....	64
1.2	L'angle d'approche de la disponibilité économique de long terme	66
1.3	La révolution industrielle comme point de départ.....	67
2	De la nature comme source de l'économie à la nature comme contrainte	72
2.1	Les physiocrates : l'économie et la reconnaissance du rôle la nature	72
2.2	La période classique et marginaliste : les ressources naturelles comme un corridor vers l'état stationnaire	73
3	L'épuisement des ressources naturelles, un enjeu pour l'Etat et les entreprises	77
3.1	L'insuffisance de la réponse technologique face aux comportements économiques : Le paradoxe de Jevons	77
3.2	Le mouvement de conservation.....	80
3.3	La rupture Hotellinienne : la prise en compte du temps dans la théorie économique	82
4	Les remises en causes avant-gardiste de l'épuisement en période de croissance.....	86
4.1	Le pic de Hubbert : les phénomènes géologiques comme facteur explicatif et prévisionnel de l'épuisement.....	86
4.2	Paul Ehrlich : Le renouveau des thèses malthusiennes remis au centre de l'écologie.....	91
4.3	Goergescu Roegen : une approche physique et critique de la perception économique de l'épuisement.....	93
4.4	Le rapport Meadows : Une approche via les systèmes	101
5	Le regain de considération pour la sphère des ressources naturelles	106

5.1	La littérature Néo-Hotellinienne	106
5.2	Skinner : une explication géologique de la substitution à venir des métaux rares vers les métaux abondants.....	123
5.3	Simon et les abondancistes : le savoir comme rempart à l'épuisement des ressources	127
6	Conclusion.....	129
CHAPITRE 3 : LE PRIX ET LES AUTRES INDICATEURS DE RARETE ET DE L'EPUISEMENT D'UNE RESSOURCE NATURELLE		137
1	Introduction	137
2	Les indicateurs géologiques de la rareté.....	140
2.1	Les ressources en place	141
2.2	Les réserves	143
2.3	Le ratio production sur réserves (R/P)	146
2.4	L'évolution des découvertes.....	148
2.5	Les ressources ultimes.....	151
2.6	Conclusion sur les indicateurs géologiques	152
3	Les indicateurs économiques de la rareté	152
3.1	Les coûts.....	153
3.2	Les prix.....	157
3.3	Les rentes.....	163
3.4	L'élasticité de substitution	166
3.5	Conclusion sur les indicateurs économiques.....	167
4	Les indicateurs sociaux-environnementaux de la rareté.....	171
4.1	Les indicateurs de coût en énergie	172
4.2	Les autres indicateurs environnementaux	176
4.3	Conclusion générale sur les indicateurs	184
5	Application au cas des métaux rares : quel(s) indicateur(s) de la rareté ?.....	186
5.1	Le cas du lithium	187

5.2	Le cas de l'indium	191
6	Conclusion	194
PARTIE II CONTRAINTES AFFECTANT LA DISPONIBILITE ECONOMIQUE DES METAUX RARES		196
CHAPITRE 4 : CONTRAINTE DE PRODUCTION LIEE A L'EXTRACTION EN SOUS-PRODUIT DES METAUX RARES		198
1	Introduction	198
2	Analyse du lien théorique entre un sous-produit et son produit primaire	202
2.1	Considérations théoriques découlant de la production en sous-produit.....	202
2.2	Limites pratiques et réelles à la contrainte de sous-produit	204
3	Analyse empirique du lien entre sous-produit et produit primaire	210
3.1	Evaluation par le test du signe.....	210
3.2	Evaluation d'une relation de cointégration	211
3.3	Evaluation d'une relation de cointégration avec possibilité de rupture	215
3.4	Synthèse des résultats.....	216
4	Evaluation prospective de la saturation de l'offre potentielle	217
4.1	Estimation de l'offre potentielle de sous-produit.....	217
4.2	Extrapolation sur la disponibilité future.....	219
5	Conclusion	225
CHAPITRE 5 : ANALYSE DES RISQUES ATTACHES A L'ABSENCE DE MARCHE ORGANISE.....		227
1	Introduction	227
2	Causes concourant à la création de marché à terme	229
2.1	Littérature établie sur les causes de l'émergence des marchés à terme.....	229
2.2	Vers la création de marchés à terme ?.....	230
3	Conséquences d'une absence de marché à terme sur le profil optimal d'extraction d'une ressource épuisable	236

3.1	Des conséquences théoriques incertaines encore discutées	236
3.2	Les modèles théoriques construits sur la question	240
4	Impact résultant de l'introduction de marché à terme	243
4.1	Conséquences et littérature liées à l'introduction de marchés à terme.....	243
4.2	Spécificités des marchés organisés du molybdène et du cobalt.....	248
4.3	Méthodologie	253
4.4	Evolution comportementale des marchés du cobalt et du molybdène suite à l'introduction d'un marché à terme	256
5	Conclusion	265
CHAPITRE 6 : CONTRAINTE D'EPUISEMENT DE LA RESSOURCE		268
1	Introduction	268
2	Des études de criticité perfectibles	269
2.1	Les études réalisées sur le sujet.....	269
2.2	La substitution comme solution à court-moyen terme	273
2.3	Quelques exemples de scénarios prospectifs	275
3	Energie et métaux : une nouvelle lecture des perspectives associées à la transition énergétique.....	280
3.1	Baisse tendancielle du surplus énergétique sociétal.....	280
3.2	Coût énergétique de la production de métaux et conséquences découlant de leur épuisement.....	284
4	Déconcentration de l'énergie et des métaux : une perspective de très long terme ..	288
4.1	Etudes modélisant l'impact de l'épuisement des métaux à très long terme	289
4.2	Impact de l'épuisement du cuivre à l'horizon 2050 sur l'EROI de différentes technologies d'énergies renouvelables	289
4.3	Impact de l'épuisement des métaux sur l'EROI de différentes technologies d'énergies renouvelables à très long terme	291
4.4	Discussion	295
5	Conclusion	298

CONCLUSION GENERALE	301
BIBLIOGRAPHIE	309
ANNEXES	335
1 Annexes au chapitre 1.....	335
1.1 Transformation des variables et autres annexes relatives à l'ACP	335
2 Annexes au chapitre 2.....	339
2.1 Substitution des ressources naturelles par le capital	339
2.2 Limites inhérentes au recyclage	340
3 Annexes au chapitre 3.....	343
3.1 Les différentes définitions autour des réserves et ressources.....	343
3.2 Annexes relatives aux relations minerais – Energie.....	348
4 Annexes au chapitre 4.....	349
4.1 Evolution des conditions d'équilibre statistique d'un monopoleur produisant à la fois un produit primaire et un sous-produit.	349
5 Annexes au chapitre 5.....	356
5.1 Le modèle de Dasgupta et Heal (1979) et extensions	356
5.2 Annexes relatives au modèle économétrique du cobalt et du molybdène.....	368
6 Annexes au chapitre 6.....	376
6.1 Calculs détaillés et représentations graphiques complémentaires.....	376
6.2 Intensité en métaux de différentes énergies renouvelables	377
Table des matières	379
RESUME/ABSTRACT	385

RESUME/ABSTRACT

Un nombre croissant d'études académiques et de rapports d'organismes internationaux relèvent une dépendance accrue des nouvelles technologies de l'énergie vis-à-vis d'une catégorie de ressources souvent prénommés métaux rares. Parallèlement, il se forme depuis plusieurs années des inquiétudes sur la disponibilité économique de ces métaux pour opérer la transition énergétique nécessaire à la lutte contre le réchauffement climatique. Cette thèse a donc pour objectif de souligner l'ensemble des contraintes et des risques qu'implique l'usage fréquent et généralisé de ces métaux dans les nouvelles technologies de l'énergie. Une première partie de la thèse est consacrée aux indicateurs et aux théories reliées à la disponibilité économique de long terme d'une ressource non renouvelable tout en faisant apparaître un ensemble de traits communs partagés par les métaux rares. La seconde partie de cette thèse démontre les risques attachés à une absence d'élasticité prix de l'offre de métaux rares du fait d'une contrainte de sous-produit. Elle offre également une analyse approfondie des causes et des conséquences relatives à l'absence de marché à terme pour la quasi-totalité de ces métaux rares. Enfin, son dernier chapitre propose d'explorer la liaison très forte existant entre le secteur de l'énergie et le secteur des métaux. Il y est démontré que cette connexion s'accroît et qu'elle implique la possibilité d'un cercle vicieux entre des énergies toujours moins concentrées (avec un contenu en métaux grandissant) et des métaux qui consomment toujours plus d'énergie sous l'effet de leur épuisement.

A growing number of academic studies and international organizations reports have noticed an increasing dependency of new energy technologies on a specific class of natural resources often called minor metals. For several years, worries about economic availability of these metals in order to realize the energy transition have appeared. This thesis aims at underline the broader risks and constraints involved by general use of these metals in new energy technologies. A first part of this thesis is devoted to theories and indicators related to the depletion of non renewable resources. This part also shows that minor metals share many characteristics and that they can form a group of metal consistent. In a second part, this thesis addresses the issues linked to the absence of price elasticity for the supply of minor metals due to the byproduct constraint. Another chapter offers an analysis of causes and consequences connected to the absence of futures markets for almost all minor metals. Finally, a last chapter highlights the strong link existing between the energy sector and the metals sectors. This connection is increasing and can create a vicious circle between energies

which are less and less concentrated and metals which consume more and more energy due to their depletion.