université de BORDEAUX

THÈSE PRÉSENTÉE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE

L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE de SCIENCES ÉCONOMIQUES, GESTION et DÉMOGRAPHIE (E.D. 42)

SCIENCES ÉCONOMIQUES

Par Ekatérina VOSTRETSOVA

Rôle et Comportement des *Treatment Charges* dans la valorisation des concentrés métalliques

Role and Behaviour of Treatment Charges for Metal Concentrates Valuation

Sous la direction de Yves Jégourel, Maître de Conférences HDR

Soutenue le 17/12/2015

Membres du jury :

M. **BOUËT, Antoine**, Professeur des Universités, Université de Bordeaux, **Président**
M. **TAMVAKIS, Michael**, Professor of Commodity Economics, City University of London, **Rapporteur**
M. **CANDAU, Fabien**, Maître de conférences HDR, Université de Pau et des Pays de l'Adour, **Rapporteur**

Remerciements

Cette thèse a pu être menée à son terme grâce à plusieurs personnes que je souhaite particulièrement remercier pour leur aide et leur soutien.

Je voudrais tout d'abord remercier mon directeur de thèse, Yves Jégourel, pour son aide et son implication pendant toute la durée de mon travail. Il a toujours été là pour me soutenir et me guider dans ce long travail de rédaction.

Je tiens également à remercier le regretté professeur Yannick Marquet qui avait tout de suite imaginé et entrevu le potentiel d'un tel sujet, pourtant si peu connu et exploré à l'époque, et à qui j'aurais tant aimé faire lire cette thèse.

Mes remerciements vont également à Delphine Lahet, qui m'a permis de poursuivre le travail sur cette thèse pendant la période difficile de transition.

Je remercie ensuite le professeur Antoine Bouët pour avoir accepté la présidence de mon jury de thèse ; ainsi que le professeur Michael Tamvakis et Fabien Candau pour avoir accepté la charge de rapporteur.

Je tiens aussi sincèrement à remercier le professeur Sophie Brana, directrice du LAREFI, pour ses conseils et son soutien durant toute ma scolarité à Bordeaux, ainsi que le professeur Antoine Bouët (qui a pris sa suite), toujours disponible et à l'écoute, qui a pris le temps de m'orienter dans mon travail. Ses remarques m'ont permis d'envisager ma modélisation sous un autre angle, encore un grand merci pour le temps qu'il y a consacré. De la même manière je tiens à remercier Ion Lapteacru pour sa disponibilité et ses précieux conseils qu'il m'a prodigué tout au long de mon travail, et le professeur Jean-Marie Cardebat pour ses conseils concernant la préparation de la soutenance.

Bien entendu, ce travail n'aurait pu être mené à bien sans l'aide de différents spécialistes des matières premières qui m'ont fourni les données et m'ont fait confiance. Je tiens en premier lieu à remercier particulièrement Mike Sinden de Brook Hunts qui m'a fourni gracieusement leur fichier de données sur le concentré. Mes remerciements vont aussi bien entendu à Patrick Weller, mon ancien responsable chez Euromin, pour ses conseils et là encore la transmission de la base de données de la société, extrêmement précieuse en informations. Les archives d'USGS adressées par Amy Tolcin m'ont également permis d'enrichir considérablement mes propos.

Au cours de ces années j'ai pu rencontrer à plusieurs reprises Chris Parker de Brook Hunts Mackenzie et je dois l'avouer ces rendez-vous m'ont aidé à clarifier ma pensée et à faire avancer

ma réflexion, je le remercie pour ses conseils avisés.

A défaut de pouvoir lui envoyer une caisse de Krug, comme il me l'a demandé, je remercie particulièrement Jay de Zeeuw d'avoir pris le temps de m'expliquer les arcanes du monde du zinc.

Mes remerciements vont également aux personnes anonymes ou non qui ont répondu à mon questionnaire, leurs réponses constituant des données importantes à la réalisation de ce travail de thèse.

Ayant pris, je le crois, une part active à la vie du laboratoire, je souhaite remercier tous les thésards que j'ai côtoyé pendant ces années. Je remercie plus particulièrement Ibrahima Sangaré pour ses conseils, Thomas Humblot pour sa patience de relecteur et Viola Lamani avec qui nos discussions se sont souvent nourries autour d'une tasse de thé. Merci à Marie Itoiz pour ses remarques, à Etienne Pellon, Julie Angly et Guillaume Ducourneau pour la relecture ; leurs regards de néophytes, sur ce thème, m'ont été d'une grande aide pour préciser et affiner mon propos. Je n'oublie pas non plus Christel Chaineaud et Cyril Mesmer, grâce à qui les démarches administratives ont été plus faciles ainsi que les bibliothécaires de l'URFU pour leur appui documentaire et bibliographique.

Un grand remerciement enfin à mon employeur qui a toujours été compréhensif vis-à-vis de mon emploi du temps chargé et par rapport à mes contraintes personnelles liées à cet agenda de recherche.

Heureusement que j'ai pu compter sur ma famille et mes amis durant ces années !

Pour être honnête, la question fréquente « quand est-ce que tu finis ta thèse ? » a été une bonne chose. Finalement ce rappel régulier, que dis-je, récurrent, a été pour moi essentiel pour garder le cap et ne pas dévier de mon objectif. Je remercie particulièrement mes parents, Elena et Alexey, d'avoir cru en moi et de m'avoir soutenu tout au long de cette aventure scientifique. Un grand merci à Dima, Tania et Anton pour leurs encouragements ainsi qu'à Tiapa et Glasha pour leur compagnie et leur bonne humeur. Un grand merci à Françoise, Renaud et Josette pour leur écoute, leur apport régulier en enthousiasme et en protéines grâce à leur fourniture de « vivres » !

Ces remerciements ne peuvent s'achever sans un mot particulier pour Louis dont le soutien quotidien indéfectible et l'enthousiasme contagieux à l'égard de mes travaux et d'autres projets m'ont toujours permis d'avancer. Enfin, je remercie Victor d'avoir été calme et sage, ce qui m'a laissée le temps de terminer la rédaction de cette thèse.

A ma mère et à son père, ils sauront pourquoi...

« *Even if it turns out that time travel is impossible, it is important that we understand why it is impossible.* »

Stephen Hawking

Table des Matières

Introduction Générale 1

1 La TC comme instrument de coordination 25

2 La TC en tant que prix 99

3 Rôle, variations et futur de la TC 167

Conclusion Générale 249

Bibliographie 255

A Elements chiffrés sur la filière du zinc 269

B Compléments sur les tests de racine unitaire 275

C Maximisation du profit du mineur et du transformateur 277

D Résolution du système d'équations de l'équilibre partiel 281

E Procédure de Box et Jenkins appliquée aux séries de la TC 289

F Etude du questionnaire 295

G Simulations numériques et code GAMS 307

Liste des Tableaux 314

Liste des Graphiques 318

Liste des Encadrés 319

Table des Matières 325

Introduction Générale

« Treatment charge : the canary in the zinc mine »

CETTE métaphore est utilisée par la société Mc Leod Williams (2013) pour caractériser ce concept mal identifié, utilisé encore aujourd'hui sur un certain nombre de marchés des métaux non-ferreux. La *Treatment charge* (TC) correspond à une déduction du prix du minerai au titre des frais de la transformation de ce minerai en métal. La métaphore utilisée par Mc Leod Williams (2013) traduit l'importance de la notion de Treatment Charge, tout en faisant référence à un procédé ancien, voire obsolète qui existe encore. C'est ainsi que la TC est perçue par une grande majorité des intervenants sur le marché[1].

On trouve des références à la TC dans des ouvrages traitant la transformation du minerai en métal, dans des articles spécialisés consacrés aux marchés non-ferreux, dans les bilans et rapports d'activité des entreprises minières et de celles produisant le métal. La plupart des auteurs utilisent les termes "déduction", "paramètre du contrat", "valeur appliquée à la transformation" comme synonymes de la TC. Dans (Metal Bulletin, 22 fevrier 2011)[2] la TC est définie comme déduction du prix du minerai acheté auprès des mineurs. Dans Söderberg (2012) la TC est définie comme le montant payé au transformateur pour la transformation du minerai en métal. Söderström (2008) décrit la TC en tant que déduction de la valeur du concentré dont le montant de base est négocié annuellement. Malgré une certaine transparence de la méthode par laquelle la TC est intégrée par les firmes dans leurs calculs, sa signification, son rôle théorique semblent être plus difficiles à cerner.

Le sentiment de malaise et d'inconfort vis-à-vis de "l'objet TC" transparait dans les rapports proposés par les industriels ou par les analystes. Par exemple, TECK (2012) précise que la TC correspond théoriquement au coût de transformation du concentré en métal, mais cette variable est devenu un terme de contrat négociable et revêt donc une valeur commerciale, stratégique, similaire à la marge opérationelle. NYRSTAR (2009) indique également que la TC jointe à la proportion de métal payable constitue un moyen de partage de la valeur du métal entre le transformateur et le mineur.

La TC est considérée par certains en tant que valeur repère sur le marché du concentré, il s'agit alors d'une valeur validée et comprise par les intervenants sur le marché (Cehlár

[1] La métaphore vient de l'industrie du charbon où on descendait un canari dans une mine afin de s'assurer de l'absence de gaz toxiques.

[2] Fondé en 1913, Metal Bulletin est un journal de référence pour les industriels du secteur des métaux non-ferreux publiant des informations sur les prix, des analyses et des statistiques.

et Cehlárová, 2007). C'est donc une valeur « cible » qui pourrait être interprétée en termes d'organisation de la filière, elle permet aux intervenants d'établir une stratégie de production transparente. D'autres enfin considèrent la TC comme une variable de prix, négociée certes, mais servant de base aux transactions entre les firmes incapables d'influencer le niveau de la TC (Brook Hunt, 2008, Angel Broking, 2008, Brook Hunt, 2010). Selon ces analystes la TC est surtout liée au prix de transformation du concentré en métal et répond à la description d'un prix dans un système de prix relatifs.

Metal Bulletin (22 fevrier 2011) s'interroge sur la TC et sur les facteurs qui sont perçus comme étant à l'origine de sa variation, en sollicitant les firmes intervenant directement sur le marché. La TC est variable et son niveau semble réagir au prix du métal[3], aux facteurs macroéconomiques (offre et demande)[4], au niveau du stock du concentré[5] et aux facteurs conjoncturels[6]. Nous sommes donc en présence d'un phénomène ayant une définition légale claire, celle d'un paramètre du contrat, mais dont la signification fonctionnelle est mal appréhendée par les intervenants.

Pour comprendre l'utilisation de la TC, il est nécessaire de partir de l'organisation technique de la filière, avec les flux de matière qui y sont associés. Le concentré est produit en tant qu'extrant par le mineur et sert d'intrant pour le transformateur qui l'utilise pour produire le métal et pour le vendre sur le marché du métal (graphique 1). C'est donc le métal sous différentes formes qui est l'objet de la transaction (métal contenu dans le minerai, métal contenu dans le concentré, métal pur).

Néanmoins, le mineur sera rémunéré seulement à hauteur de 85% du métal contenu dans le concentré. Historiquement le taux de recouvrement du métal à partir du concentré oscille entre 83% et 87% et la valeur de 85% a été retenue en tant que référence de la quantité de métal payable. Les métaux annexes (produits connexes potentiels) sont payés de la même manière et la présence d'impuretés est pénalisée (voir figure 2)[7].

[3] "The big drop in spot prices compared with last year's contract deals was one of the factors that sources said would force smelters to settle for lower numbers this year." (Metal Bulletin, 02 mars 2009).

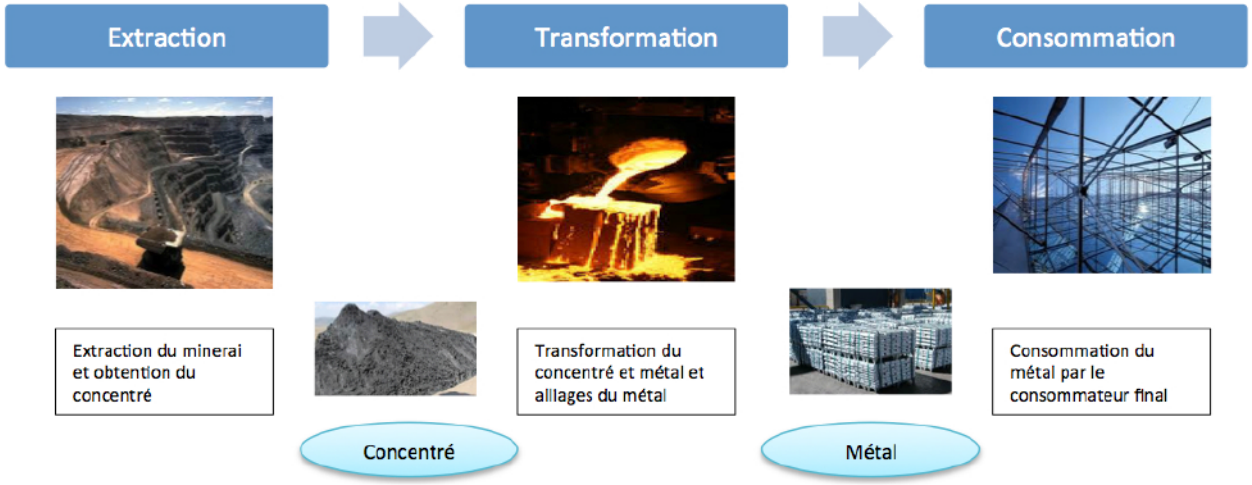
[4] ""Zinc TCs are going up these days, with the looser market for concentrate supply", said an analyst in Shanghai." (Metal Bulletin, 19 juin 2009)

[5] ""Lots of miners in China have stocked certain amounts of zinc concentrates and finished sorting them, in this case, it's unlikely that the offers can fall much in the coming months" (Metal Bulletin, 21 octobre 2009)"

[6] "TCs have been volatile since late last year. They fell as low as $90 in March when supplies tightened on zinc miners suspending operations because of the global recession, an official at a zinc smelter in Xizang said." (Metal Bulletin, 21 aout 2009)

[7] Ce schéma de filière simplifié représente uniquement les firmes impliquées dans la transformation du métal. Ainsi, on regroupe dans la rubrique *Consommation* la totalité des opérations réalisées avec le métal pur. Ces opérations peuvent inclure d'autres étapes de transformation et réalisation des produits semi-finis. qui dépassent le cadre de notre travail. De cette manière, nous entendons sous le terme de *transformation* uniquement la transformation du métal à partir du concentré.

Graphique 1: Étapes de production du métal et sources associées de revenu



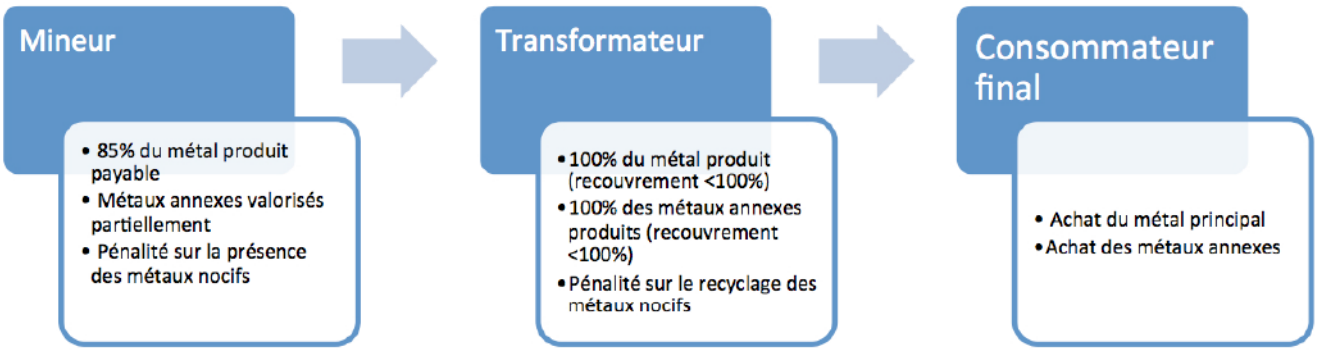
Source : (NYRSTAR, 2011)

Les firmes de la filière produisent du métal sous différentes formes et les interactions entre ces firmes sont régies en partie à l'aide de la TC, ce dont témoignent les extraits des articles cités ci-dessus. La TC est une déduction de la valeur du concentré lorsque celui-ci est vendu par le mineur. La TC apparaît donc dans ce schéma lors de la transaction entre les mineurs et les transformateurs et sert en premier lieu à calculer le prix associé au transfert de propriété du concentré métallique.

On distingue la TC de référence (TC annuelle ou TC de base) et la TC réalisée (TC spot). Ces deux valeurs coexistent et représentent les deux facettes d'un même phénomène. La TC annuelle est une valeur de référence pour les contrats conclus, elle est le résultat des négociations annuelles des firmes formant la filière de production du métal. La TC spot n'est rien d'autre que la valeur de la TC au jour le jour, calculée en fonction du cours du métal. La TC spot est donc très volatile et elle varie en fonction du prix du métal et par conséquent, des facteurs influençant ce prix. Il semble à ce stade légitime de s'interroger sur l'existence de cette TC de référence négociée annuellement. Sa raison d'être est liée aux caractéristiques de la filière de production du zinc métal.

Le fonctionnement de la filière du zinc métal repose sur la régulation des flux et la coordination des décisions entre les firmes. En effet, le processus de la production du métal se décompose en plusieurs étapes, chacune correspondant à une opération particulière. Il est donc nécessaire de disposer d'un instrument de coordination pour ajuster les décisions de production et les approvisionnements. Chaque firme veut éviter le risque de rupture d'approvisionnement ainsi que son corollaire l'excès de stock. La matérialisation de ces risques est en effet très rapidement

Graphique 2: Schéma simplifié du paiement du métal contenu dans le concentré



Source : Auteur

coûteuse pour l'ensemble des acteurs.

D'autres possibilités existent pour gérer les risques d'approvisionnement (voir Tanguy (2013)). L'intégration verticale, l'utilisation de contrats à long terme, qu'ils soient à prix fixe ou à prix variable, sont des alternatives potentielles[8]. La TC se substitue à ces alternatives sur les marchés de métaux non-ferreux et dépasse la notion du prix de transfert pour des raisons à première vue historiques. Notre analyse montrera que les autres méthodes présentent des inconvénients expliquant ainsi le maintien de la TC sur les marchés de métaux. La présence d'une variable négociée affectant le prix des intrants n'est pas propre aux marchés des matières premières non-intégrés verticalement et pourrait potentiellement convenir dans d'autres contextes.

Les négociations annuelles découlent donc de ce besoin d'un instrument révélant une information nécessaire à la bonne marche de toute la filière. Le niveau de la TC rend publique une information jusque là privée, ce qui lui confère un intérêt particulier aussi pour les agents économiques qui ne font pas partie du processus de production, comme par exemple les traders. Lors des négociations, les firmes prennent en compte les facteurs relatifs à l'offre et à la demande du concentré et du métal, à la disponibilité des capacités de production et de transformation, etc. Tous ces facteurs sont à l'origine de la variation de la TC de base d'une année à une autre.

Naturellement, toutes les firmes participant aux négociations n'ont pas le même poids et diffèrent en fonction de leur pouvoir du marché. Cette différence crée des conditions favorables à des manipulations du marché ou à des stratégies de long terme visant l'amélioration de son

[8]Notons que la majorité des contrats à long terme sont conclus avec un *prix à fixer*. Le prix est alors inconnu lors de la conclusion du contrat et les contractants s'accordent sur une période de fixation du prix ainsi que sur la référence de prix utilisée pour la fixation. Par exemple, on peut conclure un contrat le 1 mars 2015 avec le prix fixé sur la base de la moyenne du prix de marché de novembre 2015. Le prix fixe et le prix variable utilisés dans les contrats à long terme correspond souvent au *prix à fixer*.

propre positionnement par rapport à celui des concurrents. La coordination de la filière à l'aide de la TC ne semble pas créer des conditions pour un partage du profit équitable et peut contenir des dérives. Notamment, lorsque le pouvoir de négociation est concentré dans les mains d'un groupe de firmes ou bien réparti d'une manière inégale entre les mineurs et les transformateurs.

La TC de base va, par conséquent, connaitre une certaine évolution d'année en année du fait des négociations. Les firmes doivent donc d'abord s'adapter aux écarts entre le niveau de la TC de base souhaitée et celui de la TC de base obtenue. A cette première source d'incertitude partiellement contrôlable, s'ajoute l'indexation de la TC réalisée sur le prix du métal. Les variations intra-annuelles du prix du métal sont à l'origine de l'écart entre la TC de base et la TC réalisée. Cette indexation sur le prix du métal confère à la TC réalisée un caractère volatil et instable qui se traduit par des écarts considérables entre la TC de base et la TC réalisée. Sachant que les firmes concluent des contrats de long terme à l'aide des prix à fixer, la volatilité de la TC peut avoir des conséquences sur les résultats de leurs transactions.

Ainsi, une variation de la TC réalisée défavorable risque de pénaliser en premier lieu les firmes situées au milieu du processus de production dont le revenu dépend du niveau de la TC. Une source finale de divergence entre TC de base et TC réalisée est l'application des coefficients de variation, coefficients de hausse ou de baisse appliqués en cas de forte fluctuation du prix du métal. La TC reflète alors un mécanisme de valorisation du concentré métallique très complexe, ou certains facteurs (prix du métal [9], concurrence) vont dans le sens d'une plus forte volatilité sur le marché tandis que d'autres (TC de base, coefficients d'ajustement, négociations) visent à lisser ces fluctuations. La TC agit à la fois comme un rempart contre des fluctuations excessives et comme un moyen de préserver suffisamment de concurrence et/ou de pouvoir de marché aux acteurs de la filière.

Il subsiste donc un risque de prix important pour les firmes, liées aux mécanismes entretenant la volatilité de la TC réalisée. Il n'existe pas d'outils similaires aux outils de couverture, qui seraient parfaitement adaptés à la gestion du risque du prix lié à TC. En conséquence de quoi, le risque de la TC est sous-estimé et ne peut pas être correctement géré par les firmes constituant la filière non-intégrée. Ceci tient à la fois aux comportements individuels et stratégiques (information restant privée lors des négociations) ainsi qu'aux autres problèmes de liquidité touchant de nombreux acteurs.

Nous sommes donc avec la TC en présence d'un objet complexe, qui est connu des intervenants sans pour autant être bien compris et étudié. La TC revêt des caractéristiques d'une valeur repère, d'un prix, d'un coût ou bien encore d'une variable de profit. La TC est présente

[9] voir (Labys, 2005) récapitulant les travaux sur les facteurs explicatifs du prix du métal et la volatilité

dans les relations entre des firmes qui méconnaissent souvent son importance et ne semblent pas apprécier son rôle d'ensemble. Ainsi, les firmes accordent souvent une importance démesurée au prix du métal au détriment de la TC (Achzet et Helbig, 2013, Crowson, 2001). Il semble paradoxal d'ignorer les mécanismes de coordination en amont de la filière qui, par le biais du processus de production, déterminent en partie les évolutions du marché du métal.

Le concentré métallique est valorisé à l'aide de la TC. Ainsi, afin de mieux appréhender le rôle de la TC, nous nous focalisons sur les interactions entre les offreurs et les demandeurs du concentré métallique que nous désignons par les termes *mineurs* et *transformateurs*. Le concentré métallique est bien évidemment le principal intrant pour la production du zinc métal, ce qui explique les références fréquences au marché du métal dans ce document. Toutefois, nous plaçons les évolutions du marché du métal en dehors du cœur de notre analyse.

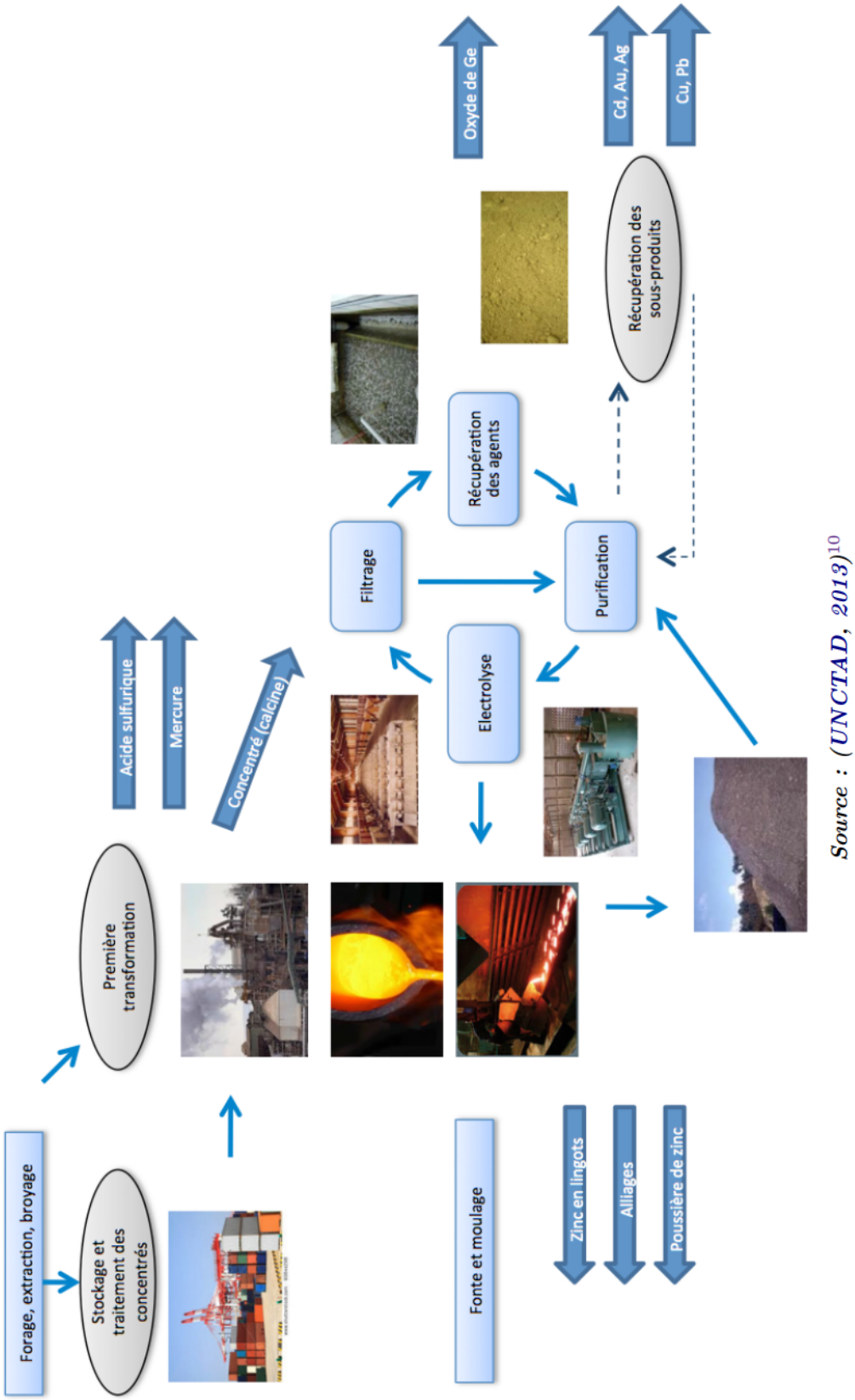
La Treatment Charge : principaux concepts et situation actuelle

Le processus de production du métal se décompose en trois étapes principales : la production du minerai, la concentration du minerai, la transformation du concentré en métal. Le schéma 3 représente le processus étendu de la production sur l'exemple du zinc.

Le processus de production s'articule autour de deux types sites : la mine et le site de transformation. Les interactions entre les deux sites sont très nombreuses et comprennent des flux physiques autant que financiers. Le processus de production du zinc permet l'obtention non seulement du métal principal, mais également d'autres métaux et éléments chimiques. Ainsi, lorsque l'on cite la filière de production du métal on doit également tenir compte de tous les produits annexes obtenus à partir du concentré.

Nous avons choisi de baser notre étude de la TC sur la filière du zinc métal et ce choix appelle une justification. La méthode de valorisation basée sur la TC est propre au marché des concentrés de métaux non ferreux : nous avons donc d'abord limité notre champs d'étude aux métaux de ce type. Parmi les métaux non ferreux, le choix du zinc s'impose par la disponibilité des données et par l'absence de volatilité excessive de son prix. En effet, nous avons du écarter le cuivre et le plomb en raison des caractéristiques spécifiques de leurs variations de prix, d'une trop grande volatilité et cyclicité.

Graphique 3: Etapes de la production de zinc



Source : (UNCTAD, 2013)[10]

Le cuivre a un prix nettement plus élevé que le zinc et le plomb, son cours est plus volatil[11] et sa formule de valorisation prévoit non seulement la TC mais aussi la RC (charge de raffinage). Le plomb, quant à lui, est caractérisé par un mouvement cyclique lié à son caractère nocif (Sedor, 2008). Le plomb étant utilisé principalement pour produire des batteries, sa consommation fluctue en réponse à la demande du secteur automobile mais aussi en fonction de la législation visant à limiter son utilisation. Au vu de ces facteurs, nous avons décidé d'effectuer notre étude sur le concentré du zinc et de proposer des possibilités de généralisation de cette étude à d'autres métaux non ferreux.

Après avoir justifié le choix de notre terrain d'étude, il nous faut également préciser le rôle des acteurs de la filière et les concepts utilisés dans ce document. Le mineur (ang. *mining company*) correspond à une firme qui procède à l'extraction du minerai via l'exploitation d'un gisement ou d'une mine[12]. Le minerai, quant à lui, est extrait des mines à ciel ouvert ou des gisements en profondeur. Il contient très peu de métal, environ 1%-3%. Il est donc peu rentable de le commercialiser sans aucun traitement préalable compte tenu des coûts de transport exorbitants et du peu de matière 'utile' contenue dans celui-ci. La concentration est alors une étape obligatoire pour le transport de la matière extraite.

En ce qui concerne le concentré métallique (ang. *metal concentrate*) c'est un produit minier obtenu à partir d'un minerai par l'enrichissement de ce minerai en métal principal. Il se présente sous forme de graines fines de la taille d'un grain de sable. On distingue différents types de concentré selon le métal principal contenu dans le concentré[13]. Par exemple, lorsque l'on parle du concentré de zinc, on se réfère au minerai enrichi, composé de 45%-55% de zinc ; le concentré de cuivre contient quant à lui, environ 30% de cuivre. En dehors du métal principal, d'autres métaux et impuretés sont contenues dans le concentré, celles-ci seront retirées lors de la transformation du concentré en métal qui une fois pur, ne contient presque aucune impureté (99,99%).

Le prix du concentré inclut la valorisation de tous les métaux utiles contenus dans le concentré. Les mineurs et les transformateurs utilisent les mêmes règles afin de valoriser les métaux contenus dans le concentré. Il s'agit non seulement de valoriser les métaux utiles, mais égale-

[11] Les études suivantes comparent les propriétés statistiques des séries de prix des métaux non-ferreux : Gleich von *et al.* (2008), Chen *et al.* (2012), Geman et Smith (2013). Vincent Rich dans Rich (1994) soutient que la volatilité du prix du cuivre s'explique par les facteurs spécifiques tels que les grèves sur les sites miniers et les sites de transformation, le changement des politiques gouvernementales du stockage, les spéculations sur le LME et les conditions météo déplorables.

[12] A titre d'exemple on peut citer la mine Red Dog, situé dans les montagnes De Long. Le plomb, le zinc et l'argent peuvent être extraits de cette mine composée de 4 gisements : Main, Aqqaluk, Paalaaq and Qanaiyaaq.

[13] La mine Red Dog produit le concentré de zinc et de plomb. Le concentré de zinc y obtenu a une teneur moyenne de 55.2% Zn, 3% Pb et 137g/t Ag alors que le concentré de plomb contient en moyenne 56.1% Pb, 11.7% Zn et 435g/t Ag.

ment de pénaliser en termes de prix le concentré contenant trop d'impuretés. Les règles de la valorisation permettent de dissocier l'analyse de la composition du concentré de son pricing qui se traduit par la fixation du prix en référence à la période de cotation.

Le transformateur (ang. *smelter, custom smelter*) est assimilé à une firme effectuant la production du métal pur à partir d'un concentré métallique. Deux types de technologies permettent la transformation du concentré en métal : la pyrométallurgie et l'hydrométallurgie assortie d'une l'électrolyse.

Le négociant (ang. *trader*) est un intermédiaire entre le transformateur et le mineur dont l'activité consiste à prendre les positions sur le marché physique et à supporter les risques liés à ces positions[14] une contre une rémunération. La marge commerciale réalisée par le négociant correspond à la différence des prix d'achats et de vente. Le négociant achète le concentré auprès du mineur et le vend au transformateur, il se charge ensuite de l'acheminement de la matière première d'un site à l'autre et, accessoirement du stockage du concentré. L'activité de négoce occupe une place de plus en plus importante dans les transactions du concentré (pour l'instant on considère que les services logistiques font partie de l'activité de négoce).

"La fonction du négociant est double. D'abord, il assure une transformation technico-commerciale du produit dans la mesure où il ne revendra pas exactement dans les même termes qu'il a acheté. Ceci peut aller d'une prise en charge peu importante à une transformation technique où industrielle du produit. Entre ces deux extrêmes peuvent apparaître diverses activités : stockage, transport, allotement, concentration, etc. Ensuite, il prend en charge un produit qu'il ne peut pas en général revendre immédiatement. Il assure donc un rôle de conciliation des timings des ventes des producteurs et des timings des achats des utilisateurs (activité de stockage et prise de risque de variation de prix entre les dates d'achat et de vente)" (Marquet, 1992)

La localisation des firmes sur le marché du zinc reste très variable. Le concentré de zinc est produit dans une cinquantaine de pays dont une part importante de la production mondiale provient de la Chine, de l'Australie, du Pérou, des Etats-Unis et de l'Inde. Une trentaine de pays disposent des capacités de transformation, parmi lesquels on trouve la Chine, la Corée du Sud, l'Inde, le Canada et le Japon classés en proportion du volume transformé. Le rôle de la Chine dans la production et la transformation du concentré du zinc s'est sensiblement renforcé depuis les vingt dernières années.

La production chinoise du zinc est passée de 20% de la production mondiale en 1997 à environ 34% de la production mondiale en 2007, ce qui correspond à une croissance moyenne de 10% par an alors que la croissance de la production mondiale était d'environ 5% par an.

[14] Risque de prix, risque de transport, risque de contrepartie etc.

La Chine est structurellement déficitaire en concentré et a recours à l'importation de concentré pour maintenir son activité de transformation.

Cette répartition géographique des sites d'extraction et de transformation a donné lieu à l'apparition de sociétés minières et de transformation internationales présentes sur plusieurs marchés des métaux. L'un des plus importants mineurs chinois, *Minmetals* exploite des mines de zinc, de cuivre, de plomb, de nickel, de l'or, d'argent et d'autres métaux. Ses mines sont localisées au Canada et en Tasmanie, Australie. *Nyrstar* est le plus important transformateur de concentré de zinc avec des sites en France, en Belgique, au Pays-Bas, en Australie, au Norvège et aux Etats Unis.

Glencore/Xstrata, *Teck* et *New Boliden* sont présentes dans le secteur de l'exploration, l'extraction et la production des métaux et minéraux variés. *Xstrata* dont le siège est basé en Suisse, possède des mines en Australie et des sites de transformation en Allemagne, en Grande Bretagne ainsi qu'en Espagne[15]. *Teck* possède la plus importante mine de zinc du monde, Red Dog en Alaska et ses activités couvrent la production de zinc, de cuivre, de molybdène, de niobium, d'argent et de charbon.

Nous notons que la taille des firmes varie en fonction des pays, mais la filière reste assez concentrée et les dix mineurs les plus importants détiennent environ 42% des parts de marché. De la même manière, près de 49% de l'activité de transformation est réalisée par les dix plus grandes sociétés de transformation, dont nous présentons le détail dans le chapitre 1.

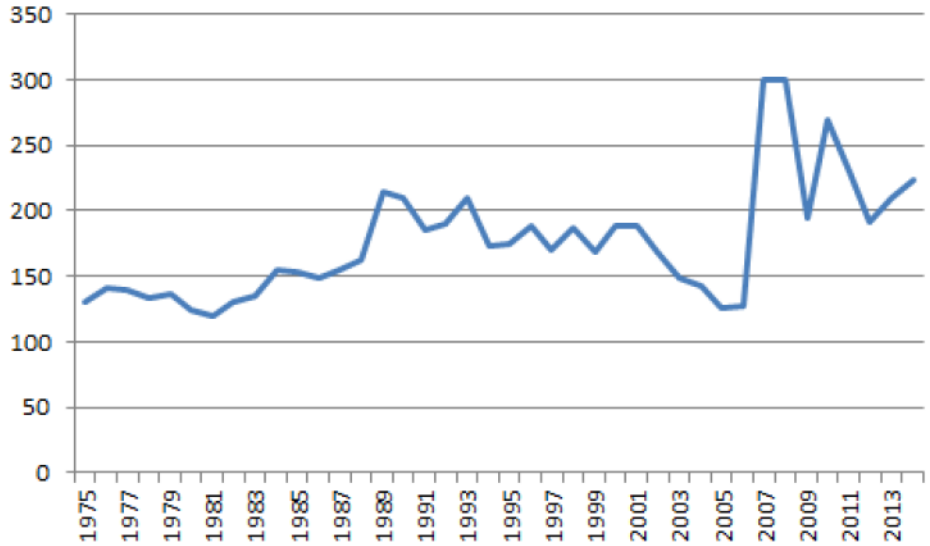
En ce qui concerne la définition de la TC, elle vient naturellement de la formule du prix du concentré que nous détaillons dans le chapitre 1. La TC est *une déduction qui s'applique à la fin de la valorisation du concentré*. S'agissant de la comptabilisation de la TC par les firmes, elle représente un revenu pour les transformateurs et une charge pour les mineurs. Par conséquent, une TC élevée est favorable aux transformateurs tandis qu'une TC basse profite aux mineurs. Les transformateurs et les mineurs sont donc directement impliqués dans la négociation de la TC et vont utiliser différents arguments afin d'obtenir une TC plus favorable.

La TC obtenue par cette rencontre représente donc une valeur négociée, reflétant un rapport de force sur le marché. Elle reflète en même temps l'anticipation d'un certain nombre de changements sur le marché, espérés ou attendus par les acteurs. La variabilité de la TC de base témoigne de cet équilibre changeant induit par les négociations comme en témoigne le graphique 4 illustrant les fluctuations de la TC sur la période de 1975 à 2012 Euromin (2014).

Dans les années 80, la demande en zinc augmente en moyenne de 1,65% par an ce qui est

[15]Il s'agit de la structure de la compagnie avant la fusion avec la société *Glencore* qui a eu lieu le 2 mai 2013

Graphique 4: TC de Base (1975-2014)



Source : Euromin, 2014

inférieur à la croissance mondiale de la production industrielle. Dans les années 90, la croissance du secteur du bâtiment chinois et l'utilisation généralisée de la galvanisation dans le secteur du bâtiment et de l'automobile créent des tensions de demande sur le marché du zinc et pousse son prix à la hausse Plachy (1992). Les fluctuations de la TC de base ne semblent pas suivre celles du prix du zinc, même si ce dernier joue un rôle important dans l'industrie du concentré, notamment en ce qui concerne les ouvertures de nouvelles mines, devenues rentables en raison des hausses de prix.

A partir du milieu des années 90 la croissance des capacités de transformation est principalement due à l'apparition de nouveaux transformateurs en Chine mais aussi à la réorganisation de la production dans les pays de l'ancienne URSS et à l'augmentation des capacités des transformateurs existants. Les capacités de transformation sont supérieurs à la quantité du concentré disponible, ce qui permet aux mineurs de négocier unn TC plus basse.

La bulle spéculative sur les matières premières touche le prix du zinc à partir de 2006 et un niveau de prix élevé perdure en 2007. La TC suit ce mouvement avec un pic en 2006. Puis elle baisse en 2007, indépendamment du prix élevé du zinc, sous l'impact du surplus sur le marché provoqué par une activité minière plus importantequi s'explique par la hausse du prix du métal.

A la fin des années 2000 la production minière et les capacités de transformations augmentent de manière presque équivalente, alors que la demande en zinc métallique continue de croitre sans que l'offre puisse suivre, principalement en raison de l'augmentation de la demande

chinoise (soit 30% de la demande mondiale en zinc). Pour satisfaire cette demande, les transformateurs chinois et indiens augmentent leurs capacités de production. Les transformateurs chinois, notamment *Yunnan Chihong Zinc*, *Shaanxi Baoji Dongling Group* et *Huludao Zinc Industry* ont ouvert de nouvelles lignes de transformation. La hausse de la demande indienne en zinc est d'environ 10% entre 2005 et 2006. Afin de répondre à cette augmentation de la demande le principal producteur intégré indien, *Hindustan Zinc Limited*, augmente les capacités de son unité de transformation *Chanderiya zinc smelter* ainsi que celle de sa principale mine Rampura Agucha.

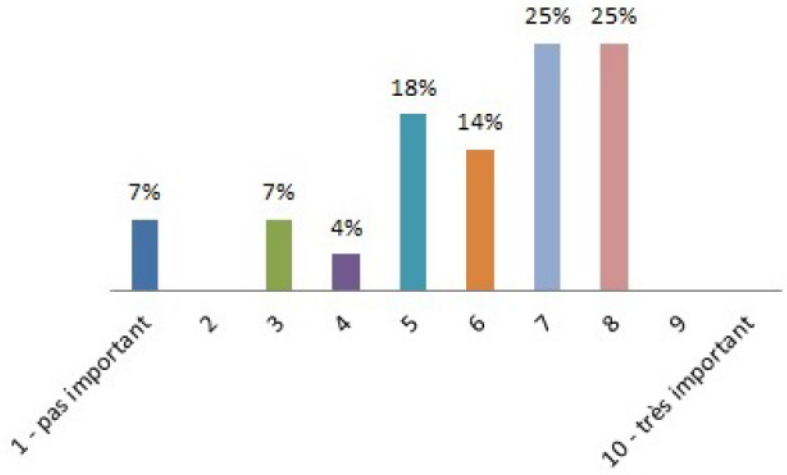
Le marché du métal commence à accumuler un léger surplus dès 2008. En raison du ralentissement de l'économie mondiale à partir de 2008(Redoulès, 2008), la consommation en zinc au deuxième semestre 2008 baisse[16] et de nombreux projets d'ouverture de mines sont reportés ou annulés suite aux incertitudes liés à la reprise économique. La moyenne de la TC sur cette courte période de 2006-2010 est de 294 \$/t, cette valeur est supérieure à la période précédente (la TC moyenne est de 187 \$/t entre 1989 et 2005).

Pour autant, le niveau de la TC reste assez élevé malgré une baisse de la demande du métal, ce qui témoigne d'un temps d'ajustement long et et du caractère indépendant des transactions sur le concentré qui sera présenté dans le chapitre 2. Ce niveau de la TC permet aux transformateurs de bénéficier d'un revenu complémentaire lorsque le prix du métal est élevé, sans pour autant être exposés au risque de prix du métal qui est supporté par les mineurs.

Malgré le pic de 2006, la TC reste à un niveau assez élevé pendant quelques années, en réponse à la surcapacité de la production minière. Son niveau commence à baisser de plus en plus, en raison d'une menace de déficit du concentré à partir de 2010. La tendance s'inverse en 2011 où le déficit du concentré se réduit conduisant en 2013 à un surplus de concentré du zinc et à un déficit d'offre sur le marché du métal. Par ailleurs, la lente reprise en 2013-2014 n'a pas modifié sensiblement la valeur de la TC actuelle. Compte tenu de l'épuisement d'une des plus grandes mines de zinc au monde, Red Dog, les firmes s'attendent à des changements structurels sur le marché dans les années à venir. Ces évolutions structurelles seront l'occasion d'un repositionnement stratégique des mineurs et des transformateurs.

[16]Selon (UNCTAD, 2014) 50% du zinc est utilisé dans la galvanisation. L'acier galvanisé est consommé en grande partie dans le secteur automobile et dans la construction. Ces deux secteurs ont été particulièrement touchés lors de l'éclatement de la bulle immobilière.

Graphique 5: L'importance de la TC



Source : Auteur

La Treatment Charge : problématique et stratégie d'étude

Après cette présentation de l'évolution historique de la TC et avant toute autre considération, il semble nécessaire d'identifier les enjeux posés par la TC. Le rôle de la TC ne semble pas être suffisamment bien identifié et compris par les intervenants. La TC occupe une place importante dans les transactions sur le concentré, on surveille sa variation, on négocie sa valeur.

91% des firmes de la filière interrogées dans le cadre de l'enquête que nous avons mené[17], estiment que la TC est un élément important de leur activité (Graphique 5). Certaines sont impliquées dans les négociations de la TC, d'autres la considèrent comme donnée, mais toutes les firmes impliquées dans les transactions du concentré sont touchées par ses variations. A titre d'exemple, en 1989 la TC s'élève à 249 $/t, pour atteindre 390 $/t en 2006, tout en passant par des niveaux anormalement bas en 2003 et 2002 à respectivement 122$/t et 136 $/t.

Même en identifiant la TC comme un phénomène particulier, la recherche universitaire ne permet pas encore de répondre à un certain nombre de questions l'entourant. Quelles sont les variables à l'origine des variations de la TC ? Comment la TC est-elle négociée ? Est-ce que son niveau s'établit librement ou bien est-ce qu'il résulte d'un arbitrage entre les firmes ayant un pouvoir de marché ? Comment les firmes font-elles face à la volatilité de la TC ? Lorsque le revenu de la TC obtenu par le transformateur ne couvre pas ses coûts, que se passe-t-il ? Existe-t-il une tendance générale dans l'évolution de la TC ? Et finalement, est-ce que la TC telle qu'elle a été pensée et introduite a toujours sa place sur le marché ?

[17] Une présentation exhaustive du questionnaire est disponible dans le chapitre 3.

Apporter des éléments de réponse à ces questions suppose une stratégie de recherche cohérente, mobilisant des outils divers. Il s'agit tout d'abord de proposer un cadre d'analyse théorique pour identifier les variables jouant un rôle dans la détermination de la TC. Ces variables sont à la fois des variables observables, telles que le prix du zinc métal mais également des composants non observables comme les interactions entre les acteurs de la filière. Il faut ensuite caractériser les évolutions de la TC, afin de déterminer si celle-ci se comporte comme un quasi prix de marché, ou si elle reste un outil de coordination entre les mains des acteurs de la filière. Enfin, il nous faut pouvoir évaluer les évolutions à venir et par conséquent, établir un cadre pour une prospective et des scénarios d'évolution.

Le cadre méthodologique de notre travail dépasse le cadre unique de l'économie des ressources naturelles (Hotelling, 1931). Nous explorons alors le phénomène de la TC avec les outils de l'économie industrielle, de la microéconomie, de la finance, de l'économétrie et de la statistique. Cette démarche nous amène à proposer un modèle théorique de la TC ainsi que des applications empiriques sur les données réelles. Celles-ci permettent de simuler le comportement de la TC en réponse aux changements des autres variables sur le marché. Nonobstant la difficulté de disposer des données historiques sur la TC, nous avons compilé notre propre base des données à partir d'ouvrages spécialisés pour compléter notre travail d'une étude empirique de la TC et de ses propriétés statistiques.

Nous proposons donc d'étudier la TC dans son contexte, c'est-à-dire, sans dissocier le phénomène de la TC des interactions qui ont lieu au sein de la filière de production et sans l'isoler du marché du métal. Nous estimons qu'il s'agit en effet, d'une condition nécessaire pour appréhender la TC dans sa globalité et dans sa complexité. La structure du marché, le niveau de profit et les réactions des firmes aux changements des variables macroéconomiques ont par conséquent un poids considérable dans ce contexte. Notre objectif méthodologique est de construire un cadre théorique dans lequel peuvent s'inscrire une analyse plus empirique des évolutions de la TC. A cette fin, nous proposons un modèle d'équilibre partiel pour la TC, calibré sur la filière du zinc.

En combinant nos observations sur les séries statistiques avec les résultats de notre modèle analytique, nous construisons un modèle en équilibre général calculable, visant à estimer un certain nombre de scénarios autour des évolutions de la TC. Nous calibrons ce modèle sur les événements historiques concernant la TC. Ceci nous permet alors de dégager des conclusions originales sur les usages passés de la TC notamment à propos des stratégies des acteurs, mineurs comme transformateurs, et de comprendre ainsi les enjeux entourant le maintient de la TC sur le marché du zinc.

La TC est pour nous révélatrice, elle constitue un indicateur avancé des mutations profondes de la filière de production du métal. Il nous semblait donc primordial de compléter notre travail d'analyse objectif par une étude de la perception, nécessairement subjective, de la TC par les firmes. Nous avons alors proposé aux acteurs un questionnaire visant à évaluer le rapport de force entre mineurs, transformateurs et négociants sur le marché. Ce travail de collecte des données nous fournit des informations précieuses et exploitables sur la réalité du terrain et les inquiétudes des intervenants quant à son évolution. Ces éléments nous ont permis de nourrir à la fois notre travail de caractérisation théorique de la TC mais aussi de formuler des hypothèses crédibles pour la construction de nos scénarios prospectifs.

La diversité des outils et des méthodes utilisées dans le cadre de cette thèse pour l'analyse de la TC constitue selon nous un des apports majeurs de notre travail à l'économie des ressources naturelles. Le caractère novateur de notre stratégie s'explique en partie par l'absence d'analyses économiques dédiées à la TC. Cette dernière est évoquée indirectement dans la littérature académique consacrée à la valorisation des concentrés mais aussi dans cette liée à l'exploitation des ressources et aux interactions entre les firmes (Goldie, 1991, Boyanov *et al.*, 2011, Malewski et Krzeminska, 2012, Sedor, 2008, Moats *et al.*, 2010). Par ailleurs, l'étude de CHR Metals Limited (2005) souligne l'importance de la TC en tant que part des coûts variables de la courbe des coûts sans pour autant chercher à comprendre ses fluctuations. Cependant, l'introduction de la TC dans les calculs de profitabilité des sociétés minières ou des sociétés de transformation est assez sommaire (Hewitt et Wall, 2000, Singhal, 1998).

Malgré la variété des disciplines traitant de la production minière et de l'extraction, nous notons une absence d'études sur les relations entre les mineurs et les transformateurs. Nous constatons une vision très sommaire du processus de production où les transformateurs ne sont pas considérés comme des acteurs économiques à part entière. Très souvent, l'extraction, l'enrichissement et la transformation sont réduits à une seule étape, celle de la production du métal. Ce choix paraît discutable dans la mesure où le positionnement des transformateurs est très particulier dans la production des métaux non-ferreux puisqu'ils interviennent à la fois sur le marché du métal ainsi que sur le marché du concentré.

De plus, la notion de la TC est presque absente de ces études. En effet, on la retrouve seulement dans les calculs du profit de l'exploitation minière (Goldie, 1991), alors que l'apport de la TC est crucial pour expliquer les réactions des transformateurs et des mineurs ainsi que pour compléter le débat sur les risques associés à la pérennité de l'offre du métal. Enfin, la volatilité de la TC est source de risque pour le mineur et pour le transformateur. L'analyse de la formation du prix et de la valorisation du concentré devrait être complétée par une étude de l'impact de la TC sur les équilibres respectifs du transformateur et du mineur, puisque la TC

conditionne leurs positions profits respectifs.

Nous proposons trois chapitres articulées autour de l'étude de la TC et de son rôle sur le marché. La TC est particulière car elle semble revêtir des caractéristiques propres à un prix en même temps que celles propres à un instrument au service d'un mécanisme de coordination. Le chapitre 1 présente l'industrie du zinc et la TC en tant qu'outil de coordination de cette industrie à travers son rôle de variable repère (*benchmark*). Les déterminants de la tendance de long terme de la TC y sont également présentés.

Le chapitre 2 se focalise quant à lui, sur les fonctions de prix remplies par la TC. En partant des fonctions d'un prix, nous proposons une modélisation en équilibre partiel des échanges du concentré où la TC joue le rôle de prix. Dans le chapitre 3 nous étudions les réactions des variables du marché aux chocs structurels (stress-test), avant de définir différents profils de firme au sein de la filière. Nous nous basons sur ces deux éléments afin de formuler un certain nombre de préconisations quant à la gestion du risque de la TC.

Nous avons souligné que sans la TC la coordination pour la production du concentré dans sa structure actuelle semblait difficile. Ainsi, l'utilisation de la TC en tant qu'outil de coordination est tout à fait justifiée. Cependant, une vision de la TC en tant que *benchmark* est très réductrice du point de vue de l'analyse économique, car la TC introduit également des éléments concurrentiels et est partiellement déterminée par des éléments de marché purs. La TC peut donc être analysée en partant de l'hypothèse qu'elle est une valeur repère négociée de façon endogène au sein de la filière, ou bien un quasi-prix de marché qui s'impose à tous de façon exogène.

En l'absence de bibliographie pouvant orienter notre choix de modélisation nous avons fait le choix de poursuivre l'étude de la TC dans ces deux directions, sous la forme de deux hypothèses testables. *A priori*, nous ne disposons pas d'assez d'éléments pour exclure l'une de ces deux lectures de la TC, un choix serait donc purement subjectif et non fondé scientifiquement. Ce refus de choisir constitue une autre originalité de notre travail et nous semble particulièrement important dans le cadre d'une thèse de doctorat. Les deux premiers chapitre de ce document sont donc construits de façon à tester séparément ces deux hypothèses dans deux cadres différents, avant de procéder à une synthèse partielle dans le dernier chapitre.

Présentation et discussion des résultats

Le premier apport de notre travail est l'identification de cinq contraintes de production propres à la filière de zinc :

- L'hétérogénéité des concentrés ;
- La sécurité des approvisionnements ;
- Les coûts de main d'oeuvre ;
- Les coûts d'énergie ;
- Les coûts de transports.

L'hétérogénéité du concentré et la contrainte de l'écoulement des flux physiques est propre à l'industrie minière ; les contraintes de coûts de main d'oeuvre, de l'énergie et de transport caractérisent l'activité de transformation. Ces cinq contraintes donnent un cadre à notre analyse et leurs modifications constituent des "indicateurs avancés" des évolutions de la TC.

Les firmes minières sont considérées en tant qu'entités "fixes" et les firmes transformatrices sont définies en tant qu'entité "semi-fixes". Les premières sont nécessairement conditionnées par la localisation des gisements. Les secondes peuvent théoriquement se re/dé-localiser, mais le font peu en pratique en raison des coûts fixes élevés induits. L'éloignement progressif des sites miniers (en quête de ressources) des sites de transformations (restant sur les lieux de consommation) entraine un besoin de coordination de l'activité des firmes et de leurs flux physiques. Ainsi, la formalisation des relations entre les mineurs et les transformateurs s'est traduit par la mise en place de la TC négociée dont le rôle est exploité à travers deux hypothèses quant à sa nature (prix ou benchmark).

L'étude de la TC en tant qu'instrument de coordination (hypothèse 1) nous a permis d'identifier une relation de long terme entre la TC, le prix du métal et le stock. Nous démontrons dans le chapitre 1 qu'il existe bien un équilibre de filière défini à la fois par un niveau de prix du métal, un niveau de TC et un niveau de stock de concentré. Tout choc sur l'une ou l'autre de ces variables entraine une déviation temporaire de l'équilibre de la filière dont l'ajustement se fait en moins de 5 ans. La coordination de la filière a lieu via des négociations intégrant de ces trois variables. C'est donc bien un accord sur un équilibre technique, qui garantit les approvisionnements de chacun et qui contribue à la relative stabilité du marché du zinc.

Nous postulons dans le chapitre 2 que la TC est le prix marché pour les échanges de concentré de zinc ; c'est une hypothèse testable dans les conditions de la concurrence pure et parfaite (CPP). Dans ce cadre, nous démontrons que la TC converge via les mécanismes d'allocation du marché vers un niveau d'équilibre. Analytiquement, la TC peut être intégrée en tant que prix dans les programmes de production des firmes et conduire à une situation Pareto-optimale. Empiriquement l'analyse de la série TC de base ne rejette pas l'existence d'un équilibre de long terme vers lequel tendrait la TC. Cette validation concerne uniquement la TC spot, la TC de base affiche un comportement pseudo-cyclique sans convergence vers un équilibre de long terme. L'hypothèse 2 est par conséquent invalidée sur le long/très long terme, mais peu convenir à une analyse de court ou moyen terme dans un contexte stable.

La validation simultanée de ces deux hypothèses a priori contradictoires peut étonner. L'explication tient dans leur validation partielle. Au sens étroit, la TC spot et la TC de base ont un comportement compatible avec un marché ayant certaines caractéristiques de la concurrence pure et parfaite (l'atomicité et l'information parfaite). Mais nous observons des délais d'ajustements indiquant que cette compatibilité n'est qu'apparente. Il est alors impossible de savoir si la convergence se fait vers un équilibre instable, négocié ou bien si l'équilibre vers lequel tend le marché est un équilibre stable et Pareto-optimal.

De la même façon, l'hypothèse 1 est validée par le rôle des stocks dans l'ajustement des quantités échangées et par les déterminants des variations de la TC. Les niveaux de la TC sont fixés de façon à garantir une répartition économiquement soutenable des profits de la filière mais aussi à assurer les approvisionnements et à contrôler indirectement les entrées et les sorties des firmes sur le "marché du concentré". Pour autant les échanges de concentrés ne sont pas dépourvus de toute dimension concurrentielle : les comportements opportunistes visant à accaparer profits et parts de marché restent possible. La filière est donc en concurrence imparfaite, plus proche de l'oligopole bilatéral que de la véritable entente.

Au vue de ces éléments, nous concluons que la TC correspond à une variable de *prix géré* permettant de coordonner les activités de la filière. Cette conclusion est novatrice et permet de qualifier la TC d'instrument de négociation avec des quasi-propriétés de prix de marché (définition de l'expression "prix géré"). Ses niveaux se rapprochent d'un prix en CPP sur le long terme, de même que ses fluctuations de court terme dans des contextes stables.

Son caractère "géré" (négocié) permet la coordination de la filière et une distribution soutenable, quoique sujette à tensions et concurrence, du profit global entre mineurs et les transformateurs entre ces deux horizons. Les négociations produisent un benchmark, la TC base, qui donne un cadre de soutenabilité générale pour l'ensemble des acteurs de l'oligopole bilatéral. Les forces de marché, que l'on retrouve dans la TC spot, ajuste ce benchmark aux conditions

particulières de chacun.

Cette solution originale donne un fonctionnement qui se rapproche de la CPP en terme de résultat, malgré la structure oligopolistique de la filière. La TC permet notamment, d'isoler le prix du concentré du prix du métal tout en garantissant un revenu aux transformateurs et ce faisant l'approvisionnement en zinc du marché du métal. Dans ces conditions, il est compréhensible que des acteurs puissants tentent individuellement de se passer de la TC lorsque la situation leur permet d'espérer un bénéfice. Reste à évaluer si la convergence de la TC vers un prix de marché et une organisation plus proche du cadre concurrentiel est dans l'intérêt de tous les acteurs.

Il nous reste à évaluer les conditions du changement de rapport de force au sein de la filière pouvant être à l'origine de l'évolution de la TC. Notre questionnaire vise à valider empiriquement les conclusions de nos hypothèses ainsi qu'à identifier le comportement des firmes face à la TC. D'après notre étude bibliographique aucun travail de recherche de ce type n'a pas encore été mené. Les résultats du questionnaire constituent une première étude empirique des firmes de la filière dont deux deux tendances majeures sont extraites.

Nous constatons d'abord un paradoxe important lié à la perception de la TC. Elle est considérée comme déterminante pour le profit et tout aussi importante que le prix du métal, mais les firmes acceptent de subir le risque de ses variations sans les couvrir. Ensuite, nous identifions un fort clivage entre les firmes : certaines souhaitent une évolution de la TC vers une variable de prix (accompagnée d'une évolution du contrat du concentré), d'autres souhaitent le maintient du système actuel. Plus que l'évolution de la TC c'est bien la sortie du système de la TC qui est en jeu.

Nous estimons des scénarios relatifs à une évolution de la TC dans un cadre de notre modèle en équilibre général calculable, calibré sur des données réelles. Nous constatons que la pérennité de la TC est liée à la persistance d'un intérêt commun des firmes qui passe par un partage des profits acceptable pour l'ensemble des acteurs. Lorsque les firmes anticipent ou constatent une dégradation de la situation de leurs partenaires commerciaux, elles procèdent aux ajustements (quantitatifs et ceux de la TC) pour remédier à cette situation et éviter ainsi les fermetures et les ruptures d'approvisionnement. Ceci n'exclut cependant pas toutes les actions allant à l'encontre de la "solidarité de filière". Ces actions créent une division entre mineurs et transformateurs, mais aussi au sein du groupe des transformateurs, rappelant la dimension compétitive du marché. Il apparait clairement que les évolutions potentielles du système actuel proviendront de ce type de comportements.

Nous concluons par un pronostic sur les évolutions à venir de la TC. Selon nous, le clivage entre les firmes va s'accentuer, rendant la négociation de la TC plus complexe et le consensus plus difficile à atteindre. En support à négociation du concentré, les négociants et les intermédiaires logistiques viendront s'intercaler entre les mineurs et les transformateurs dans un contexte de développement des contrats de court terme. Nous pensons, sur la base de nos conclusions, que le résultat final sera en fait une concentration géographique des capacités (notamment entre les mains des transformateurs chinois), assortie du rôle déterminant des acteurs gérant le stock : les négociants et logisticiens.

La TC évoluera alors nécessairement vers un rythme de négociation plus soutenu, potentiellement pénalisant pour la continuité des approvisionnements en raison de la volatilité croissante de la TC. Les négociations plus fréquentes rapprocheront la TC d'une variable de prix ce qui devrait participer à l'élimination des firmes inefficaces et améliorer l'efficacité de l'allocation des ressources sur le marché. Néanmoins, ce scénario porte en germe le risque important de la concentration du marché dans les mains d'acteurs dominants et du développement de comportements court-termistes.

Selon nous, il serait préférable de redéfinir la coopération des firmes sur la base d'un partage du profit plus équitable et d'un resserrement des marges dans le but d'investir dans les infrastructures de transport et de stockage. Cette solution coopérative sera difficile à mettre en œuvre, mais l'alternative concurrentielle vers laquelle l'industrie se dirige ne semble pas mieux à même de pérenniser l'approvisionnement du marché du zinc.

Ce travail constitue ainsi une première étape dans l'identification du rôle de la TC dans les échanges des concentrés métalliques. En absence d'autres études similaires nous avons alors fait le choix d'étudier la TC sur la base de deux hypothèses de travail, les deux étant assez proches de la réalité objective mais proposant un cadre d'analyse large. De cette manière, nous n'avions pas à faire d'hypothèses fortes sur la nature de la TC sans toutefois pouvoir le justifier par des travaux antérieurs. Ce premier travail d'identification était donc nécessaire au préalable, avant toute étude plus approfondie de la TC.

Les recherches futures pourront utiliser la base théorique fournie afin d'explorer les problématiques plus étroites et nuancées liées à la TC. Il s'agit notamment de l'approfondissement du modèle théorique de la TC en y intégrant les stocks et en procédant au développement du modèle dynamique de l'équilibre partiel. Les négociations de la TC peuvent être modélisées à l'aide de la théorie des jeux, ce qui constitue un développement naturel de notre travail.

Notre travail ouvre sur une application à d'autres filières de concentré métallique, notamment le cuivre et le plomb. Le cadre de travail défini dans cette thèse pourrait être enrichi par des considérations spécifiques liés à chacun de ces concentrés. Enfin, les différentes structures du marché, plus proches de la réalité, peuvent être explorées dans le cadre de notre modélisation comme par exemple, la concurrence oligopolistique, l'oligopole avec frange, le cartel. Par ailleurs, les évolutions simultanées de la structure de la filière et de la TC pourront donner lieu à une évaluation*a posteriori* des conclusions de ce travail.

Organisation de la thèse

Le chapitre 1 introduit les acteurs de la filière de zinc et les contraintes de production qui conditionnent son bon fonctionnement : les coûts de main d'œuvre, l'énergie, le transport, la contrainte des flux physiques ainsi que celle de la qualité du concentré. De ces contraintes découle la formalisation des transactions entre les firmes à l'aide du contrat du concentré. Ce contrat traduit la volonté des firmes de s'engager dans une transaction de long terme (jusqu'à 10 ans) sur la base d'éléments négociés annuellement, parmi lesquels la TC.

Dans la première hypothèse de notre stratégie nous proposons une lecture de la filière où la TC serait un *instrument de coordination* entre les acteurs. La TC est appliquée par les firmes intervenant à différentes étapes de la production du métal et ayant des stratégies différentes. Il s'agit de bâtir des stratégies d'interactions pour maximiser son profit tout en s'assurant de la profitabilité des firmes intervenants à d'autres étapes de la filière, ceci afin de garantir le bon fonctionnement de la filière et les approvisionnements. La TC peut être analysée à travers les stratégies des firmes, comme un pur instrument de coordination. Les objectifs des firmes traduisant leurs stratégies, vont aboutir à une TC négociée unique et acceptée par tous. La TC pourrait donc être définie en tant que valeur repère permettant de structurer la filière.

L'hypothèse du comportement de la TC en tant qu'instrument négociée de l'équilibre technique de la filière est testée en deux étapes. D'abord nous procédons à l'étude théorique du partage du profit au sein de la filière. Sur cette base nous identifions le stock et le prix du métal comme les deux variables d'intérêt déterminant l'équilibre technique de la filière. Ensuite, nous procédons à l'étude empirique de la relation de long terme entre la TC, le prix du métal et le stock en utilisant un modèle à correction d'erreur (MCE) basé sur les observations de ces variables entre 1975 et 2014.

Dans le chapitre 2 nous procédons au test de la deuxième hypothèse de notre stratégie, selon laquelle la TC serait une *variable de prix*. Le test de l'hypothèse se déroule en deux étapes : formalisation théorique puis validation empirique. La TC remplit alors les trois fonctions de prix identifiées par Friedman et Friedman (1979) : la transmission de l'information, l'incitation et la distribution du revenu. Il n'y a donc pas d'objection à la qualifier, sur le plan analytique, de prix de marché. Nous construisons donc un modèle en équilibre partiel représentant les mineurs et les transformateurs ainsi que les échanges de concentré et l'offre de métal. Ce modèle permet d'étudier les spécificités de la TC sans négliger les interactions avec d'autres variables, notamment avec le prix du zinc.

Notre validation empirique est basée sur l'observation classique d'une force de rappel du prix observé (ici la TC) vers une valeur d'équilibre de long terme. Nous utilisons par conséquent, le modèle du Cobweb sur la série de la TC réalisée, plus adaptée pour identifier une potentielle dérive dans la série. La convergence de la TC vers un équilibre de long terme témoigne d'un comportement d'un prix par tâtonnement walrasien. Ainsi, le comportement cyclique autour d'une valeur théorique confirme l'importance des délais d'ajustement et des différences des anticipation entre différents types de firmes.

Le chapitre 3 explore les raisons du maintien de la TC dans son état actuel. La problématique de ce chapitre est axée sur le lien entre la structure de la filière et le rôle de la TC défini par cette structure. La TC est considérée comme un indicateur avancé de l'organisation de la filière : la stabilité de la TC témoigne de celle de l'organisation de la filière. Sur la base du modèle théorique développé dans le chapitre 2 nous démontrons que les chocs passés et présents sur les paramètres de la valorisation n'ont pas perturbé l'organisation actuelle de la filière. Celle-ci est donc caractérisée comme stable face aux chocs endogènes. Selon nous, une évolution de la TC passe donc nécessairement par une modification de la filière et des rapports de force entre les firmes.

Nous proposons ensuite une étude empirique des clivages au sein de la filière sur la base des réponses au questionnaire[18]. Nous utilisons l'analyse des correspondances multiples (ACM) afin de construire ces groupes d'acteurs partageant une vision commune de la TC et de son évolution. Les évolutions demandées par les firmes sont ensuite simulées à l'aide de notre modèle calibré sur les données réelles. Ces simulations permettent de conclure que toute modification de la TC et/ou du contrat de concentré affecte le revenu des firmes, ce qui permet d'identifier les "gagnants" et les "perdants". Ces conclusions tendent à confirmer l'inertie dans l'évolution de la TC en réponses aux critiques de son fonctionnement émises par les firmes.

[18]Le détail du questionnaire et les points méthodologiques sur la collecte des données sont fournis dans le chapitre 3. L'utilisation des statistiques descriptives issues du questionnaire tout au long du déroulement de notre argumentaire permet une meilleure mise en perspective des phénomènes étudiés.

Nous concluons que le consensus sur la TC actuelle se base sur l'absence d'un pouvoir de marché absolu d'un seul groupe de firmes. Il est donc peu probable que les chocs endogènes soient à l'origine de l'évolution de la TC et de la filière. Cependant, le fonctionnement de la filière ne peut pas être dissocié de son environnement. Les firmes doivent faire face à de nouveaux défis d'approvisionnement, aussi bien en termes d'accès à long terme à la ressource brute que de gestion des contrats de court terme, et à de nouvelles contraintes règlementaires, environnementales et financières. Ces dynamiques, hors de portée directe des acteurs, peuvent accélérer le processus de l'évolution de la TC en raison d'une plus grande volatilité de celle-ci et de la complexification des métiers du mineur et du transformateur. Nous concluons que la survie de la TC dépendra de la coopération que les firmes de la filière devront mettre en place. A défaut, la coordination actuelle sera modifié sous la pression de nouveaux intermédiaires au sein de la filière, la TC perdrait ainsi son utilité.

Chapitre 1

La *Treatment Charge* : instrument de coordination pour la filière du zinc ?

Sommaire

Introduction 27

I Zinc concentré et métal : origines, acteurs, technologie 30

I.1 Origines de la production de zinc : concentré, métal principal et autres métaux du minerai 31

I.2 Les acteurs de la filière 36

II La TC dans le cadre du contrat du concentré 54

II.1 La présentation du contrat 54

II.2 Quelle modélisation pour la TC ? Hypothèses de travail et schéma de la filière 62

III L'hypothèse 1 : la TC en tant qu'instrument de coordination de la filière 66

III.1 L'interdépendance des firmes de la filière : approvisionnements et interactions stratégiques 67

III.2 La validation empirique de la TC en tant que variable de coordination (benchmark) 81

Conclusion 96

Introduction

"Every couple of years there is talk of doing away with benchmark pricing," an analyst based in London said during the International Zinc Conference in Rancho Mirage, California. "Maybe it's not as important as in the past, but it'll probably stick. If it wasn't a benchmark, they wouldn't call it a benchmark."

Metal Bulletin, Mars 2009

DANS ce premier chapitre, nous présentons le rôle majeur de la *Treatment Charge* (TC) dans les échanges de concentré métallique. Nous commençons notre analyse par une présentation des acteurs économiques et des concepts utilisés tout au long de notre travail. Par le suite, nous détaillons le cadre méthodologique de notre démarche et nous proposons une première lecture de l'objet TC en tant que valeur repère dans les échanges de concentré.

La présentation exhaustive de la filière de la production du métal et des jalons de son évolution permet de constater la complexité des relations entre les firmes au sein de cette filière. Les contraintes de production ont créé un besoin de contrôle des flux de matière et débouché sur une recherche de partenaires commerciaux fiables et fidèles. La spécialisation progressive des activités associée à l'éloignement géographique des firmes de la filière a vu naître de nouveaux besoins en coordination qui n'existaient pas auparavant. Ces éléments sont indispensables pour comprendre l'organisation actuelle de la filière de production du zinc métal.

L'identification des principaux acteurs de la filière nous permet d'introduire les premiers éléments concernant la structure de l'industrie. Nous enrichissons la vision de cette structure par l'étude de la part de marché des firmes et par la présentation de la localisation des principaux sites d'extraction et de production. Sur la base de ces éléments, nous représentons une filière type de production du métal détaillant le processus de production, les flux de matières entre les firmes et les liens entre les différents acteurs de la filière. L'organisation des échanges entre les mineurs et les transformateurs peut être assimilée à une filière non-intégrée verticalement dotée d'une structure oligopolistique (oligopole bilatéral).

Nous constatons que la structure de la filière influence les interactions entre les firmes impliquées dans la production du métal. Ce constat est fait sur la base des contraintes de production des firmes et via l'étude des arrangements contractuels régissant les transactions. L'étude de la TC nous conduit ensuite à nous concentrer sur une étape précise du processus de production : les échanges de concentré métallique. Cependant, une étude de l'intégralité de la filière de production et de consommation du métal dépasse le cadre de notre analyse, seules

les opérations de production et de première transformation de la filière seront traités en détail pour appréhender l'objet TC.

L'étude des relations contractuelles entre les firmes minières et transformatrices permet d'identifier les mécanismes sous-jacents de la coordination des activités qui s'inscrivent dans une logique de continuité des opérations de production. Les firmes ont alors recours à des contrats de long terme, pluriannuels, pour gérer les flux d'approvisionnements et de production. Or, ces contrats de long terme présentent un grand nombre de clauses spécifiques propres aux échanges de concentré. Nous détaillons dans ce chapitre les clauses usuelles et spécifiques du contrat de concentré permettant par conséquent, de juger de la complexité de l'organisation des transactions en concentré.

Les échanges de concentré sont encadrés par des règles formelles telles que les négociations annuelles ou encore par l'utilisation de formules de valorisation du concentré permettant d'établir le prix du concentré. Les négociations annuelles entre les transformateurs et les mineurs ont lieu une fois par an, au printemps, et portent sur les composantes de la valorisation du concentré exprimées dans les clauses spécifiques du contrat. Les valeurs ainsi obtenues servent de référence pour les transactions ayant lieu au cours de l'année et sont publiquement accessibles. De nouvelles négociations ont lieu l'année suivante afin de définir les valeurs actualisées des variables du contrat de concentré. La TC est introduite tout d'abord en tant que clause du contrat de concentré participant à la valorisation du concentré échangé, dont la valeur change d'une année sur l'autre

De quelle manière cet arrangement contractuel permet aux firmes d'organiser la production et de coordonner les flux de matière ? D'abord, cette coordination passe par la réduction de l'incertitude liée aux contrats de long terme. En effet, la possibilité d'utiliser la TC négociée annuellement permet aux mineurs et aux transformateurs d'obtenir des conditions de prix conformes à l'équilibre de marché et au rapport de force dans l'industrie. Néanmoins, cette réduction de l'incertitude via une TC négociée n'est pas la seule justification du système de valorisation actuel. La valorisation du concentré est réalisée à l'aide d'une formule qui tient compte des prix et des quantités de métal contenus dans le concentré. L'utilisation du prix du métal pour la valorisation du concentré témoigne alors du souci d'avoir un repère de prix commun à toutes les firmes de la filière.

Nous sommes donc en présence d'une situation assez spécifique où les firmes procèdent à des transactions sur un bien dont le prix est défini à la fois par des variables exogènes (prix du métal) et par une variable négociée (TC) entre mineurs et transformateurs. Cette situation nous pousse à émettre plusieurs hypothèses quant au rôle de la TC dans les échanges de concentré.

La première hypothèse correspond à une utilisation de la TC en tant que valeur repère négociée (*benchmark*) du contrat de concentré qui permet la coordination des firmes au sein de la filière. Ainsi, à l'aide de cet instrument de coordination, les firmes peuvent organiser leur production et partager le profit à l'intérieur de la filière. Selon cette hypothèse, le niveau de la TC traduit le rapport de force entre mineurs et transformateurs aboutissant à des équilibres multiples. L'étude de cette première hypothèse est conduite dans le présent chapitre. La seconde hypothèse, présentée au chapitre 2 postule la TC comme une variable de prix en concurrence pure et parfaite.

Nous avons choisi d'inscrire notre analyse de la TC comme valeur repère négociée dans la lignée des travaux portant sur les interactions des firmes en concurrence imparfaite. Cette analyse est basée sur les travaux de Bertrand (1883), Cournot (1838), Hotelling (1931) mais aussi ceux de von Neumann et Morgenstern (1944), Robinson (1933) et Stackelberg (1934). L'objectif de ce chapitre est de présenter le mécanisme de coordination que représente la TC et d'étudier l'hypothèse selon laquelle la TC est une valeur repère négociée (*benchmark*).

Les négociations annuelles de la TC représentent une opportunité pour les firmes de la filière de renégocier les règles de partage du profit. La TC est alors une variable de partage du profit : son niveau qui est au cœur des négociations entre les firmes. Compte tenu de la structure de l'industrie, l'obtention d'une part de profit plus importante passe obligatoirement par une modification du rapport de force entre mineurs et transformateurs. Nous concluons que le partage du profit se fait de manière inégalitaire puisque les mineurs obtiennent une part de profit supérieure à celle des transformateurs. Ce mécanisme de coordination est directement lié à la structure existante de la filière où les firmes peuvent disposer de pouvoir de marché, mais doivent trouver un terrain d'entente quant aux quantités produites et consommées.

Ce besoin de coordination traduit la nécessité d'éviter un déséquilibre quantitatif au sein de la filière, se tel qu'un surplus ou un déficit du concentré. Dans ce ces, le déséquilibre quantitatif est défini comme l'écart entre l'offre et la demande globale de concentré engendrant une variation positive ou négative du stock de concentré. Ainsi, la variation du niveau de stock est un indicateur de la disponibilité du concentré et, par conséquent, traduit le rapport de force entre les mineurs et les transformateurs. Le stock de concentré et le prix du métal sont considérés par les firmes comme les principales variables de l'évolution de la TC. Nous procédons donc à l'étude des relations entre ces trois variables et nous concluons à l'existence d'une relation de long terme. Ceci accrédite l'hypothèse d'une TC instrument de la coordination des approvisionnements au sein de la filière.

Cependant, ce résultat soulève un certain nombre de questions sur la nature de la coordination mise en place grâce à la TC. Originellement, le niveau de la TC était défini selon le meilleur équilibre technique possible, à la frontière de l'ensemble de production collectif. Aujourd'hui, la coordination de la filière à l'aide de la TC est rendue moins efficace en raison de l'exercice d'un pouvoir de marché par l'un ou l'autre des acteurs de la filière.

Or, cette situation semble satisfaire les firmes de la filière, qui considèrent que "ce qui est perdu pour le moment sera gagné demain quand le marché se retournera"(Home, 2014). La filière présente donc toutes les caractéristiques d'un oligopole bilatéral. Cette observation nous conduit à affirmer que l'instrument de coordination utilisé dans une certaine filière est lié à la structure du marché : la TC ne peut se comprendre sans cet équilibre instable entre mineurs et transformateurs. En conséquence, la rupture de cet équilibre instable par l'accroissement du pouvoir de marché d'un type d'acteur conduirait probablement à la disparition de la TC comme instrument de coordination.

Nous commençons ce chapitre par la présentation de la filière de production et de ses acteurs (section I). Le contrat du concentré est introduit dans la section II. La section III s'articule autour de la validation de la TC en tant que variable *benchmark*, passant de la caractérisation théorique d'un instrument de coordination à sa validation empirique sur la base des données historiques de la TC.

I Zinc concentré et métal : origines, acteurs de la filière et technologie d'extraction

Nous commençons notre étude par quelques rappels historiques sur les origines de la production de zinc, métal et concentré. Nous détaillons ensuite la localisation de la production de zinc en présentant l'organisation de la filière, le poids des firmes ainsi que les décisions stratégiques prises par ces firmes. A travers cette étude nous cherchons à identifier la structure de la filière.

Historiquement, les ajustements sont faits par les mineurs et le marché est dépendant de la consommation finale de zinc (*consumption-driven*). Des exemples récents montrent que cette situation est en train de changer et que les transformateurs cherchent à ajuster leur production indépendamment des mineurs, engendrant ainsi un besoin accru de coordination pour éviter les ruptures d'approvisionnement.

Nous découvrons une structure de marché assez hétérogène, caractérisée par la présence d'un nombre limité de firmes de grande taille côtoyant de plus petites unités. Nous poursuivons notre analyse en détaillant les actions des firmes composant la filière ceci afin d'identifier de potentiels déséquilibres et les réactions des firmes visant la résorption de ces déséquilibres. Nous démontrons que, compte tenu des contraintes de production, l'industrie du zinc s'est organisée de façon à maintenir les volumes de production et à favoriser les mineurs.

I.1 Origines de la production de zinc : concentré, métal principal et autres métaux du minerai

Le zinc est utilisé principalement pour la galvanisation en tant que revêtement anti-corrosion des aciers. Il s'utilise également pour l'obtention d'alliages spécifiques et en tant qu'additif dans l'industrie chimique. L'utilisation du zinc pour la galvanisation le rend indispensable dans les secteurs de la construction, de l'automobile et de l'équipement industriel.

La transformation de la blende (sulfure de zinc) en "zinc métal" date du XIIème siècle et trouve son origine en Inde où l'oxyde de zinc était chauffé dans un creuset doté d'un condenseur sur lequel se déposait le métal. Le système de creusets à condenseur a été utilisé jusqu'au XVIIIème siècle où est introduit un système de creusets horizontaux qui permet une utilisation plus rationnelle des fourneaux.

Le savoir-faire de l'industrie métallurgique est l'un des facteurs clef de la révolution industrielle en Europe. Les principaux métaux d'intérêt au XIXème siècle étaient le cuivre, l'or et le plomb (Mudd, 2009). En raison de l'absence de méthodes efficaces pour séparer le zinc des autres métaux, le concentré Pb-Zn-Ag a été principalement exploité pour l'argent qui y était contenu ; le zinc était alors considéré comme une impureté du concentré d'argent (Woodward, 1965). Napoléon Ier a créé La Société des Mines et Fonderies de la Vieille Montagne non loin du gisement belge de La Calamine dans les années 1830.

La production du zinc métallique comporte plusieurs étapes. On extrait le minerai qui contient en moyenne entre 4% et 20% de zinc métallique (SCF). Le minerai subit ensuite un certain nombre de transformations physiques (broyage et flottation) visant à éliminer la partie sans valeur du minerai. Après flottation on obtient le concentré, qui contient entre 40% et 60% de zinc métallique, il se présente toujours sous sa forme naturelle, soit le sulfure de zinc (ZnS). L'étape suivante consiste à obtenir du métal à partir du concentré de zinc grâce à une transformation chimique qui passe par une étape de grillage (chauffage du concentré) et la réduction (traitement par acide). On obtient au final du zinc pur à 99,99% sous forme de

lingots ou de barres (*jumbos*).

Nous faisons une distinction entre les formes de zinc mentionnées dans notre travail. On considère tout d'abord, le *minerai de zinc* comme le résultat de l'extraction n'ayant subi aucune transformation. Ensuite, on parle de *concentré de zinc*, plus riche en métal et obtenu après la transformation du minerai. Enfin, les termes *zinc* ou *zinc métal* ou *métal pur* correspondent au produit de la transformation chimique.

Chaque concentré a une composition unique qui est fonction des métaux contenus, dont le grade varie entre 40% et 60% avec une moyenne d'environ 55%[1]. Selon la quantité d'impuretés qu'ils présentent on distingue des concentrés plus au moins purs. Par exemple, le concentré *clean concentrate* contiendra peu d'impuretés, le concentré *dirty concentrate* sera riche en impuretés y compris en impuretés contenant des métaux précieux. Historiquement les transformateurs étaient plus enclins à utiliser le concentré pur systématiquement, refusant le concentré de moindre qualité. Le marché s'est alors progressivement scindé en deux parties : le marché du concentré pur (plus cher) et le marché du concentré mélangé (moins cher). Une autre variété du concentré est la gamme de *bulk concentrate* qui contient du zinc et du plomb en proportion 2 pour 1, avec un contenu métallique d'environ 45-60% (deux métaux confondus). Ce type de concentré peut être transformé avec un équipement spécifique, appelé *Imperial Smelting Furnace*.

Habituellement le concentré *bulk* est produit dans les mêmes mines que celles produisant déjà le concentré de zinc et de plomb, par exemple Mount Isa (Australie), Red Dog (USA) ou Brunswick (Canada). La mine Red Dog, située dans les montagnes De Long, produit plusieurs types de concentré. Cette mine se décompose en 4 gisements : Main, Aqqaluk, Paalaaq and Qanaiyaaq. Le minerai extrait de la mine contient 17.7% de zinc et 4.7% de plomb. L'étape de concentration réalisée sur le lieu d'extraction permet d'obtenir soit du concentré de zinc soit du concentré de plomb. Le concentré de zinc ainsi obtenu a une teneur moyenne de 55.2% Zn, 3% Pb et 137g/t Ag. Le concentré de plomb obtenu à Red Dog contient en moyenne 56.1% Pb, 11.7% Zn et 435g/t Ag[2].

Au XIXe siècle l'activité de mine (extraction du minerai de zinc) est indissociable de la transformation en zinc métal : l'ensemble des étapes du processus de production est réalisé sur le même site géographique par la même firme/usine. Cependant, à partir des années 1850, l'épuisement des premiers gisements conduit à une délocalisation des activités de mine, tandis que les sites de transformation restent près des gisements originels. Ainsi, la *Société de Production du zinc* (Espagne) s'agrandit et devient *Real Compañía Asturiana de Minas* suite à des

[1] http://www.zinc.org/basics/zinc_production
[2] http://www.reddogalaska.com

prises de participation dans des mines en Belgique, en Norvège et en Afrique du Nord. L'important transformateur français, *La Vieille Montagne* investit dans une mine polymétallique à Ammeberg (Suède).

Le début du XXème siècle a été marqué par la découverte de gisements dans le bassin méditerranéen et par la poursuite des exploitations au Canada et en Amérique du Sud. On assiste à la poursuite du mouvement de délocalisation des mines. L'activité d'extraction et de concentration se fait toujours sur le site minier, alors que l'activité de transformation du concentré en métal a lieu sur des sites plus éloignés, appelés sites de transformation. Les deux étapes de production du zinc deviennent progressivement indépendantes l'une de l'autre géographiquement et même juridiquement.

Une conséquence importante de cette dissociation, qui s'accentue durant le XXème siècle, est que le nombre de pays producteurs de concentré (pays "mineurs") est aujourd'hui largement inférieur au nombre des pays où ont lieu les opérations de transformation (pays "transformateurs"). Cet état de fait est lié à la structure de l'industrie, où la production d'une seule mine peut être acheminée vers plusieurs transformateurs géographiquement distants[3].

Les grands pays industriels se sont dotés d'une capacité de transformation importante : les États Unis produisent 31% du zinc métal, l'Allemagne 31% et la Belgique 21% pour un volume total de 737 000 tonnes en 1907 (SCF). L'alimentation de ces sites de transformation nécessite l'acheminement du concentré en provenance des sites miniers existants et l'exploration de nouveaux gisements.

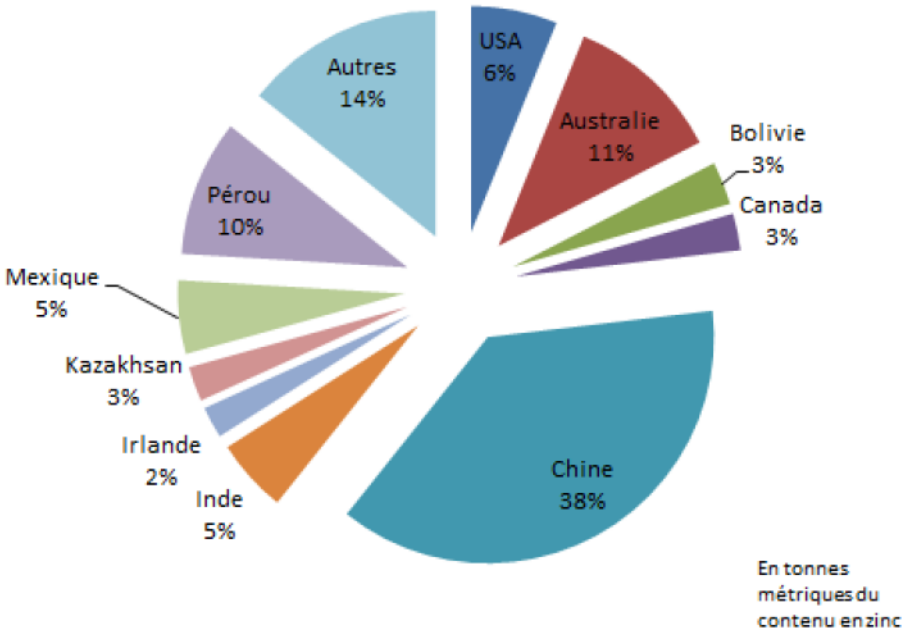
Ces nouveaux sites d'extraction doivent être reliés aux sites de transformation, ce qui engendre la construction de chemins de fer et le développement d'infrastructures portuaires pour le transport longue distance. Les mineurs nouvellement indépendants (géographiquement et juridiquement) deviennent alors dépendants de l'infrastructure de transport existante, confrontés au besoin de faire parvenir le concentré vers le lieu de transformation[4]. Le développement des activités de mine indépendantes va donc de pair avec l'essor du commerce international et nécessite une hausse du prix du métal afin de supporter ces coûts de transport supplémentaires.

De nos jours la production du concentré est devenu une activité à part. Les volumes du concentré obtenus annuellement sont similaires à ceux du zinc métal produit durant la même

[3]Ainsi, la mine *Century* en Australie fournit du concentré aux transformateurs en Australie, Asie, Europe et Amérique du Nord.

[4]La logistique associée à ces nouveaux sites miniers est complexe. *Century Zinc Mine* dans le Queensland (Australie) est par exemple dotée d'un système de transport souterrain (pipeline à boue) de 304 km qui permet d'acheminer le concentré jusqu'au Port *Century*. A partir de là, le navire *MV Wunma* d'une capacité de 5,000 tonnes transporte le concentré jusqu'aux navires affrétés pour les exportations stationnant dans la zone offshore de golfe de Carpentarie. Source : http://www.mmg.com/en/Our-Operations/Mining-operations/Century.aspx.

Graphique 1.1: Production minière du concentré de zinc en 2014, milliers de tonnes



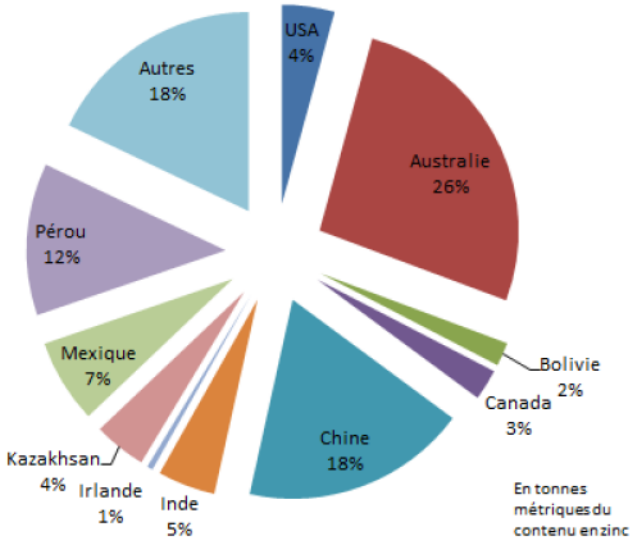
Source : USGS (2014)[5]

période. On exprime les volumes échangés du concentré ou les volumes des réserves de zinc en tonnes du zinc pur (estimation du contenu métallique) afin de ne tenir compte que de la partie utile du minerai et du concentré. Cette convention permet alors une comparaison facilitée des volumes du zinc indépendamment de la forme sous laquelle ils se présentent.

Selon USGS (2014) la production mondiale du concentré de zinc a atteint en 2014 13,3 millions de tonnes de zinc. La Chine est le plus important producteur de concentré de zinc avec environ 4,8 millions de tonnes produites. Elle est suivie par l'Australie (1,5 millions de tonnes) et le Pérou (1,3 millions de tonnes). La part des dix plus grands pays producteurs de concentré de zinc (totalisant 86% de la production mondiale) est représenté par le graphique 1.1. Le tableau A.1 en annexe A détaille la production minière et la transformation du concentré par pays.

Le graphique 1.2 reprend les principales réserves de zinc qui pourraient être exploitées dans les années à venir et ainsi modifier la localisation de la production minière du concentré. L'Australie est le pays qui possède les plus grandes réserves de zinc métal, estimées à 70 millions de tonnes (environ 20% des réserves mondiales). Elle est suivie par la Chine (43 millions de tonnes), le Pérou (18 millions de tonnes) et le Mexique (16 millions de tonnes). Les échanges de concentré de zinc entre les "pays miniers" (exportateurs) et les "pays transformateurs" (impor-

Graphique 1.2: Réserves (connues) de zinc en 2014, milliers de tonnes



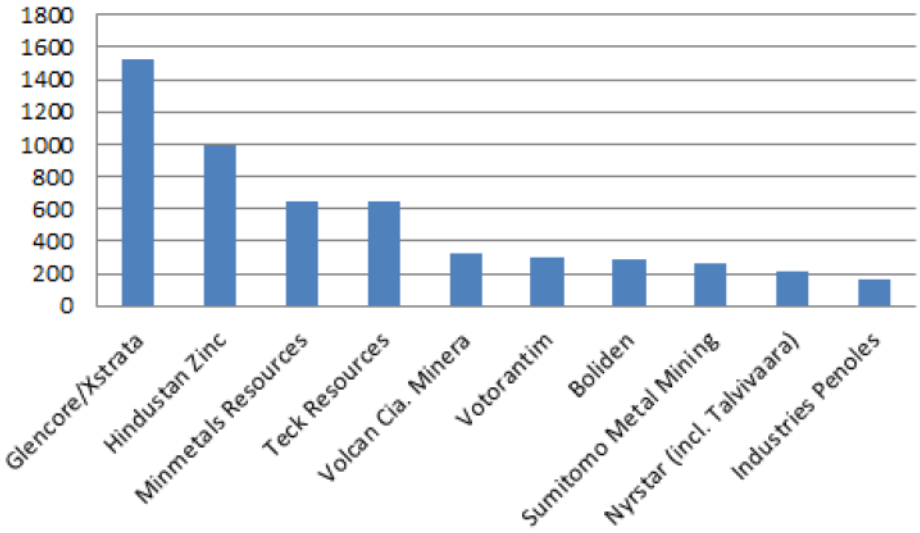
Source : USGS (2014)

tateurs) se résument à deux grands flux : de l'Australie et de l'Amérique du Nord vers l'Europe et depuis l'Amérique du Sud vers l'Asie.

Les principaux pays exportateurs de concentré de zinc sont l'Australie (1 million de tonnes), le Pérou (950 milliers de tonnes), les Etats-Unis (620 milliers de tonnes), le Mexique (340 milliers de tonnes). Parmi les principaux importateurs de concentré de zinc on trouve la Corée du Sud (875 milliers de tonnes), le Japon (570 milliers de tonnes), l'Espagne (490 milliers de tonnes), la Finlande (260 milliers de tonnes), les Pays-Bas (257 milliers de tonnes) et la Belgique (250 milliers de tonnes).

Les flux commerciaux que nous avons identifiés ainsi que la dichotomie majeure entre les sites d'extraction et les sites de transformation reposent sur deux catégories d'acteurs qui se sont dessinés dans le temps : les mineurs et les transformateurs. Nous présentons dans la section suivante les principales sociétés minières et transformatrices.

Graphique 1.3: Principaux mineurs de concentré de zinc (volume exprimé en milliers de tonnes de zinc)



Source : Statistia

I.2 Les acteurs de la filière

I.2.1 Les mineurs

Les entreprises minières sont le premier maillon de la filière de production du métal. Elles procèdent à l'extraction du minerai et à la production du concentré. Cette première étape de production est réalisée soit par des mineurs indépendants vendant ensuite leur concentré, soit par des mineurs intégrés transférant le concentré à d'autres entités de transformation au sein d'une même société.

Les compagnies minières réalisant les opérations de production du concentré de zinc sont très hétérogènes. On trouve parmi elles de grandes sociétés multinationales qui côtoient des compagnies de taille moyenne spécialisées dans la production d'un type particulier de concentré et/ou dans une zone géographique limitée.

Les dix plus grandes sociétés minières occupent une place prépondérante dans la production totale de concentré (Graphique 1.3). Elles détiennent environ 43% des parts de marché.

Ces grandes sociétés minières dépassent tout cadre national et mènent des activités dans plusieurs pays. On constate également une dichotomie entre la localisation des ressources minières et l'appartenance nationale des sociétés minières qui exploitent ces ressources. Cette

dichotomie provient d'un mouvement de consolidation du secteur minier. Ainsi, deux types d'actions sont engagées par les sociétés minières : tentatives d'intégration verticale et recherche de rentes de monopole sur la production d'un type de concentré donné (voir les contraintes techniques présentées en section I.2.3).

Ces efforts sont pour le moment bridés par le caractère contradictoire de ces deux tendances. En effet, la prise de contrôle de toute une "gamme de concentré" relève de la diversification *horizontale* alors que la prise de contrôle de sites de transformation relève d'une stratégie d'intégration *verticale*. Des firmes intégrées verticalement existent, mais ces intégrations ne sont pas majoritaires. Les limites de cette approche seront exposées plus en détail dans la section I.2.3. Par ailleurs, la diversification horizontale ne peut être que limitée compte tenu de la localisation des mines et du caractère non-homogène du contenu métallique dans le concentré.

Le dernier exemple en date de tentative d'intégration verticale est la fusion des opérations des sociétés Glencore et Xstrata le 02 mai 2013 pour former un géant mondial des matières premières. Cette fusion a créé un groupe verticalement intégré assurant les activité d'extraction, de transformation et de logistique pour livrer les clients. Cet exemple est assez exceptionnel en raison de la taille des sociétés qui fusionnent et de la diversification des opérations de ces deux sociétés (environ 90 matières premières différentes sont proposées).

Par ailleurs, un grand nombre d'acquisitions ont été menées par les sociétés chinoises qui renforcent leur présence en Asie, en Australie et en Afrique dans le but de pérenniser leur activité par un accès direct à la ressource. Cette acquisition de gisements par des firmes étrangères rentre souvent en conflit avec les intérêts nationaux des pays détenant ces ressources. A titre d'exemple, on peut citer le rachat d'une partie de *OZ Minerals* par la compagnie chinoise *Minmetals* pour devenir *Minerals and Metals Group*. Cet achat a longtemps été bloqué par le gouvernement australien en raison des prises de participation des sociétés chinoises dans l'industrie minière australienne. *Minmetals* produit actuellement du concentré de zinc, de cuivre, de plomb et de nickel dans des mines situées au Laos, au Congo et en Australie. Aujourd'hui cette entité est devenue l'une des plus importantes sociétés minières produisant du concentré de zinc.

L'exploitation des mines se fait soit de manière exclusive soit de manière partagée (entre plusieurs exploitants), ce qui permet de varier les sources d'approvisionnement et de partager les coûts d'infrastructure. Cinq des dix plus grandes mines du monde sont détenues et exploitées par plusieurs firmes en même temps, les cinq restantes sont dotées d'un exploitant unique (Voir annexe A, tableau A.3). Par exemple, la mine d'Antamina au Pérou, gisement polymétallique permettant d'extraire du zinc et du cuivre, est exploitée à 33,75% par *Xstrata*, à 33.75% par *BHP Billiton*, à 22.5% par Teck et à 10% par *Mitsubishi Corporation*.

Globalement, les pays dont les ressources minières sont importantes accueillent des implantations de sociétés minières en vue de l'exploitation immédiate ou future. Ainsi, 16 multinationales exploitent les mines australiennes alors que la plupart ne possède pas de siège social en Australie[6]. Cependant, il reste encore des pays où une seule société minière est présente comme l'Argentine, le Chili, le Honduras ou bien encore la Tunisie. Mais les ressources minières de ces pays sont relativement limitées, ce qui explique le constat de sociétés uniques.

L'implantation géographique des sociétés minières peut également témoigner d'une volonté d'exploiter des mines facilement accessibles. A titre d'exemple, la compagnie *Xstrata plc* exploite les mines Antamina, Brunswick, Kidd Creek, Lady Loretta, Lennard Shelf, (Pillara), Matagami Mines, McArthur River, Mount Isa Copper, Mount Isa Zinc et Perseverance and Reocín. Ces mines sont seulement situées dans quatre pays différents (Australie, Canada, Pérou et Espagne) ce qui facilite l'utilisation d'infrastructures existantes et assure ainsi une meilleure accessibilité des mines pour la firme. La diversité des sites miniers permet à la firme de fournir un grand nombre de transformateurs, car la qualité du concentré varie d'une mine à l'autre. Les transformateurs peuvent rechercher un concentré avec une composition très spécifique ; la réalisation des opérations sur plusieurs sites conditionne la satisfaction de la demande variée d'un grand nombre de transformateurs.

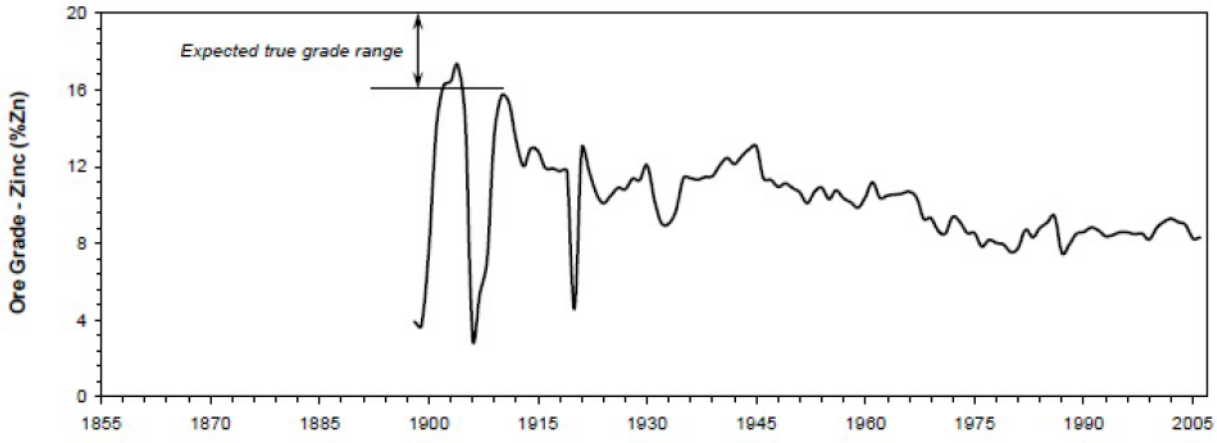
Les minerais de zinc et de plomb sont extraits ensemble dans un même minerai. Le mineur peut alors produire du concentré de zinc, du concentré de plomb ou bien encore un concentré de zinc et de plomb mélangé. La plupart des mineurs préfèreront produire un concentré monométallique ; en effet, le concentré de zinc et de plomb (*bulk*) est plus difficile à vendre pour les raisons techniques.

Le contenu en métal principal (ou contenu métallique) représente le contenu utile, c'est-à-dire une proportion qui pourrait être transformée en métal pur. Celui-ci est établi par échantillonnage (2 ou 3 échantillons prélevés) et fait l'objet d'un consensus entre le mineur et le transformateur lors de l'opération de vente. En cas de différend sur la qualité du concentré, un contre-échantillonnage est effectué par un cabinet indépendant dont les analyses feront foi. Ces analyses déterminent non seulement le contenu en métal principal, mais aussi en autres métaux et résidus utilisés afin de valoriser le concentré.

Le contenu métallique varie d'une mine à l'autre. Le concentré pur ne nécessite pas de technologie performante afin d'en extraire le métal à la différence du concentré moins riche

[6]Liste complète des sociétés opérant en Australie : *Bass Metals Limited, BHP Billiton Limited, CBH Resources Limited, China Minmetals Corporation, Indago Resources Ltd., Inmet Mining Corporation, Jabiru Metals Limited, Kagara Limited, Newmont Mining Corporation, OZ Minerals Limited, Perilya Limited, PolyMet Mining Corp., Sipa Resources Limited, Teck Resources Limited, Terramin Australia Limited, Xstrata plc, and Zeehan Zinc Limited.* Source : AME Mineral Economics, Australia, 2010.

Graphique 1.4: Evolution du contenu métallique du minerai australien



Source : Mudd (2009)

en métal principal. Par ailleurs, le contenu métallique est inversement lié au tonnage ainsi, le poids du concentré le plus pur est inférieur au poids du concentré le moins pur pour une même quantité de zinc contenu. Le mineur a alors la possibilité de modifier légèrement le contenu métallique en fonction des termes du contrat de vente (Jovanovic et Magdalinovic-Kalinovic, 2006).

Compte tenu de la forte hétérogénéité dans la composition du concentré, il a été décidé d'imposer des normes de contenu en certains métaux. Elles touchent principalement les métaux qui pénalisent le processus de transformation. A titre d'exemple, on peut citer la présence du fer dans le concentré de zinc, qui rend le processus de transformation plus complexe et coûteux. Il revient alors au mineur d'adapter son processus de concentration afin d'obtenir un concentré plus conforme à ces normes. Un non-respect des normes du contenu métallique peut impliquer le paiement des pénalités lors de la vente du concentré.

L'évolution historique du contenu métallique du minerai fait apparaître une tendance baissière. Le graphique 1.4 présente l'évolution du contenu métallique du minerai australien. Le minerai riche a été extrait en premier lieu, tandis que le minerai moins riche et plus difficile d'accès reste encore à extraire. Afin de faire face à cette baisse, les mineurs doivent développer de nouvelles technologies permettant un meilleur recouvrement du métal dans le concentré.

Un autre défi auquel doivent faire face les mineurs est l'épuisement d'un certain nombre de mines de taille importante. Le tableau 1.1 reprend les informations sur la baisse des capacités minières à partir de 2013.

Tableau 1.1: Réduction des capacités des grandes mines du monde entre 2013 et 2016

Mine	Pays	Capacité annuelle, tonnes	Fermeture
Brunswick	Canada	240 000	2013
Perseverance	Canada	115 000	2013
Lisheen	Irlande	175 000	2014
Century	Australie	510 000	2015
Bukowo Olkusz	Pologne	70 000	2016
Skorpion	Namibie	154 000	2016
Total		1 264 000	

Source : International Zinc Association (2014)

L'épuisement des mines les plus importantes pousse les mineurs à élargir leurs activités d'exploration et à étudier des projets d'ouverture de nouvelles mines. Dans le cadre d'un projet d'ouverture de mine, le mineur est exposé à une double contrainte liée à la faisabilité technique de celui-ci. La première contrainte est liée au type du gisement et conditionne en conséquence la technique d'extraction (l'extraction à ciel ouvert est moins coûteuse que l'extraction en mine). La seconde contrainte dépend de la taille du gisement et donc de la durée de vie de la mine. Celle-ci varie en fonction de la vitesse d'extraction et de la taille de gisement. Il convient alors d'estimer le plus précisément possible la quantité de matière disponible pour l'extraction afin d'évaluer la durée de vie de la mine. Cependant, l'exactitude de ces estimations ne pourra être vérifiée qu'à posteriori.

Les installations autour d'un site minier sont conçues pour une durée moyenne de 15 ans (Sedor, 2008). Cette durée correspond à l'amortissement des investissements calculée selon le prix de vente estimé et les quantités annuelles à produire. On constate que la quantité annuelle du concentré produite par le mineur est relativement stable compte tenu de la faible marge de manœuvre liée à la modification de l'output. En effet, une augmentation des quantités produites impliquerait une extraction plus rapide réduisant alors la durée de vie de la mine et modifiant son amortissement. C'est la raison pour laquelle l'augmentation des quantités produites par le mineur passe plus souvent par l'ouverture de nouvelles mines plutôt que par l'augmentation des capacités des mines existantes.

Le mineur a pour objectif d'éviter l'engorgement de la mine avec l'accumulation du concentré produit et non expédié. Durant ce laps de temps le mineur subit un risque de variation de prix de la matière déjà produite mais pas encore vendue. Le mineur chercher alors à sécuriser la vente du concentré produit (flux sortants) sans pour autant devenir trop dépendant de ses partenaires commerciaux. Il y a donc une véritable démarche de *sécurisation des flux* par l'intermédiaire d'une série de procédés visant à rendre stables et sûrs les flux de matière entre les différents

acteurs du processus de production.

Cette sécurisation des flux sortants passe par la conclusion de contrats pluriannuels avec les transformateurs pour une grande partie de la production de la mine estimée. Le reste du concentré produit sera écoulé sur la base de contrats "spot". Les contrats de vente de long terme (couvrant les expéditions par *batchs* sur plusieurs années consécutives) sont des outils qui évitent une trop forte variabilité des flux de production[7].

Le concentré produit sur un site minier est ensuite transporté jusqu'au site de transformation où sont réalisés les opérations chimiques de séparation des métaux pour obtenir le métal principal et les métaux annexes. Nous allons donc présenter cette étape de transformation qui sollicite les transformateurs et fait également partie du processus de production.

I.2.2 Les transformateurs

L'activité de transformation consiste à produire du métal pur à partir du concentré de métal par une série de procédés chimiques. On sépare le métal principal et les métaux utiles en deux étapes : grillage et réduction. La réaction de grillage permet la séparation des différents éléments composant le concentré tandis que la réaction de réduction élimine les résidus non souhaités pour obtenir le métal pur. Le processus de production est long et peut prendre plusieurs mois. Le délai entre l'achat et la vente peut avoisiner 3-4 mois durant lesquels le concentré est transporté jusqu'au transformateur pour être ensuite transformé en métal avant d'être vendu.

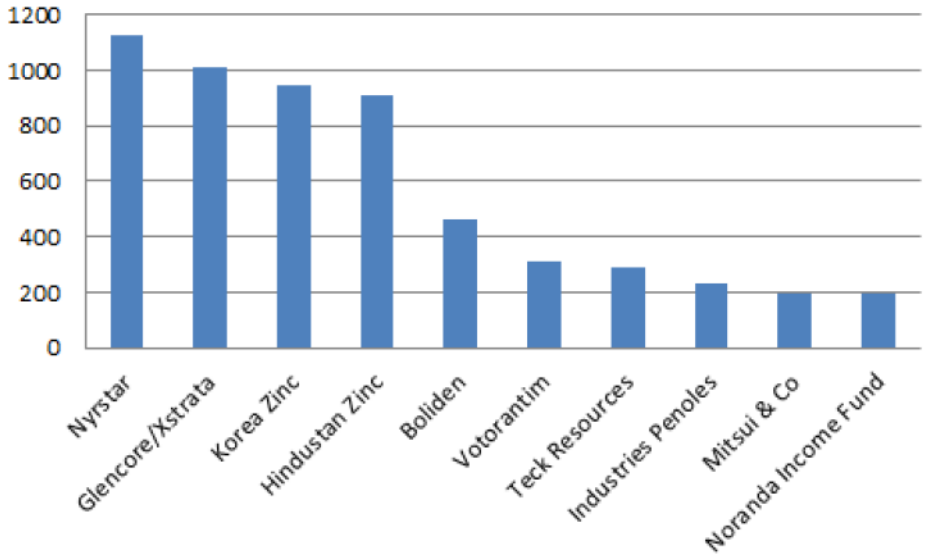
Les sociétés transformatrices sont comme les mineurs assez diverses. Leur capacité de transformation varie également, par exemple *Umicore Norway* produit 15 000 tonnes de zinc par an alors qu'*Asturiana de Zinc* fournit 460 000 tonnes annuellement. Le graphique présente les principales sociétés transformatrices du concentré de zinc.

Quatre sociétés de taille importante se distinguent des autres : *Nyrstar, Glencore-Xstrata, Korea Zinc et Hindustan Zinc*. Ces sociétés détiennent chacune entre 8% et 10% des parts de marché (Graphique 1.5). Les dix plus grands transformateurs en termes de concentré transformé détiennent environ 50% des parts du marché. De plus, les transformateurs de taille importante sont intégrés à des conglomérats multinationaux transformant d'autres métaux que le zinc.

Les quatre plus grandes sociétés transformatrices de zinc se sont formées par fusion-acquisition

[7]Le contrat est ainsi conclu sur la base des valeurs de référence (cours LME/Comex du mois M pour la valorisation des métaux, etc.). Le prix associé à ce type de contrats sera connu souvent après l'exécution du contrat.

Graphique 1.5: Principaux transformateurs du concentré de zinc (volume exprimé en milliers de tonnes de zinc)



Source : Statistia

dans le courant des années 2000. Elles ont un positionnement à part en raison de leur taille et de la diversité des concentrés qu'elles transforment. L'industrie s'est restructurée en donnant naissance à des sociétés de taille considérable qui coexistent avec des transformateurs de moyenne et petite taille. La société *Nyrstar* est créée en 2007 par la fusion entre *Umicore* (entreprise belge de production des matériaux) et l'entité de transformation du zinc et des alliages de zinc de *Zinifex*. Ainsi, *Nyrstar* possède des entités de transformation en France, Belgique, États-Unis, Pays-Bas et Australie et produit notamment du zinc, du plomb, de l'or, de l'argent et du cuivre. Ces éléments sont considérés comme des produits annexes (*by-products*) de la transformation du concentré de zinc. Les actifs restants de *Zinifex* ont été fusionné avec *Oxiana Limited* pour former *OZ Minerals*, société minière spécialisée dans le cuivre, en 2008. Notons que *Glencore-Xstrata* est également une compagnie née de la fusion entre le trader *Glencore* et le mineur *Xstrata*.

Korea Zinc, un autre géant de la transformation, détient environ 8% des parts de marché dans la transformation (incluant *Young Poong* et *SMC* en Australie). cette société produit du zinc, du plomb, du cuivre, de l'or et de l'argent. Par ailleurs, la société *Hindustan Zinc* est un des plus importants transformateurs de concentré de zinc et de plomb. La société est verticalement intégrée avec des mines localisées notamment en Inde (Rampura Agucha, Sindesar Khurd, Rajpura Dariba, etc.). La transformation sur plusieurs sites permet d'obtenir là encore du zinc, du plomb, de l'argent, du cadmium, etc.

Viennent ensuite des sociétés de taille moyenne détenant entre 1% et 2% des parts de marchés. Ces firmes sont principalement mono-produit : elles transforment uniquement du concentré de zinc et diffèrent selon les technologies de transformation utilisées et la localisation des entités de transformation. On trouve également des sociétés transformatrices de petite taille qui possèdent moins de 1% de parts de marché dont une grande partie localisée en Chine.

A la différence des sites miniers situés près des gisements, les sites de transformation sont souvent localisés près des sites de consommation ou bien dans les régions qui accueillent une activité de transformation depuis plusieurs années. Ainsi, un grand nombre de sites de transformation est situé en Europe. Par exemple, *Nyrstar* possède des sites de transformation en Belgique (270 milliers de tonnes), en France (160 milliers de tonnes) et aux Pays-Bas (260 milliers de tonnes). Quant à *Glencore/Xstrata*, elle effectue les opérations en Allemagne (150 milliers de tonnes), en Espagne (511 milliers de tonnes), et en Italie (210 milliers de tonnes). *Boliden* réalise sa transformation en Finlande et en Norvège (351 et 160 milliers de tonnes respectivement) (SCF).

On constate que les sociétés transformatrices concourent pour la prise des participations dans les mines afin d'assurer leurs approvisionnements à long terme. Certaines firmes ont mis en place une structure de production verticale, comme Boliden qui exploite la mine Tara en Irlande pour fournir les transformateurs Boliden Kokkola (Norvège) et Boliden Odda (Finlande) ainsi que d'autres transformateurs européens. Les sociétés chinoises prennent activement les participations dans les mines situées hors de Chine (ex. Australie, Mongolie, Pakistan), mais les mines situées en Europe et en Amérique restent encore fermées aux prises de participations par des firmes chinoises.

Le procédé de transformation dépend des choix techniques des transformateurs et de la taille des firmes. Les uns vont préférer automatiser un certain nombre d'opérations, tandis que d'autres favoriseront les opérations manuelles. Nous discuterons des choix de techniques de production dans la partie consacrée à la structure des coûts dans le secteur de la transformation (I.2.3).

La qualité de l'opération de transformation est évaluée en fonction du taux de recouvrement obtenu par le transformateur. Le taux de recouvrement représente la proportion du métal réellement extraite du concentré en tenant compte des pertes lors de la production (il est en effet impossible d'extraire 100% du contenu métallique du concentré). Lorsque le taux du recouvrement du transformateur est élevé, celui-ci sera en mesure de transformer le concentré à "faible" contenu métallique puisqu'il récupère presque tout le métal. Cependant, du moment où le taux du recouvrement d'un transformateur est bas, il cherchera à acheter un concentré plus "pur", afin de limiter au maximum pertes du métal lors de la transformation.

Depuis plusieurs décennies les transformateurs ont fait des efforts afin d'améliorer les rendements du processus de transformation et ainsi limiter les pertes en métal. En fonction de la technologie utilisée et en mélangeant différents types de concentrés, les transformateurs peuvent obtenir un taux de recouvrement avoisinant 99% du métal contenu dans le concentré. De fortes différences existent pourtant entre les transformateurs des pays développés et ceux des pays en voie de développement. Naturellement, le taux d'ouverture des pays au commerce international joue un rôle important permettant aux transformateurs de s'approvisionner en concentrés de compositions différentes et de procéder ainsi à des mélanges. Les travaux de Boyanov *et al.* (2011) détaillent ces techniques et démontrent que l'obtention d'un taux de recouvrement proche de 100% est faisable.

La quasi-totalité métaux « utiles » est extraire du concentré. Un concentré polymétallique, en fonction de sa composition, permet l'obtention des métaux suivants : plomb, cuivre, cadmium, or, argent et plus rarement indium, gallium, germanium, thallium. Par ailleurs, le bio-mining, procédé de séparation des métaux à l'aide des bactéries, correspond à une nouvelle technique d'exploitation et de transformation qui peut modifier sensiblement les procédés actuels (Schippers *et al.*, 2014, Rawlings *et al.*, 2003, Johnston, 2014).

Le concentré riche en produits annexes est recherché lorsque le prix du métal principal est bas afin de compenser partiellement la faiblesse du prix du métal. Si certains produits annexes tels que les métaux précieux (or, argent) sont facilement vendus sur le marché, il est assez difficile d'écouler d'autres éléments, notamment ceux pour lesquels il n'existe pas de référence de prix (l'acide sulfurique, le cadmium, l'indium, etc.)[8]. La demande pour ces éléments fluctue fortement selon les évolutions de la législation sur les substances chimiques dangereuses.

A titre d'exemple, la réglementation REACH[9] préconise une réduction de l'utilisation de cadmium, néanmoins indispensable dans la production des accumulateurs électriques et la peinture industrielle. Il revient alors au transformateur de valoriser correctement les produits annexes et de trouver des acheteurs. La vente des produits annexes représente une source supplémentaire de profit pour le transformateur sous condition de maîtriser la chaîne de distribution. Par conséquent, des produits annexes nocifs ou peu demandés sur le marché pénalisent le transformateur et génèrent des pénalités pour le mineur dans le cas où son concentré en contient.

Il en va de même pour certains produits liés à la production principale. Ils peuvent représenter des difficultés de stockage et donc « bloquer » la production, notamment dans le cas

[8]Le prix de l'acide sulfurique varie en fonction des régions et il est basé sur l'indice des prix qu'on trouve dans les éditions spécialisées, comme le PentaSul Report. Le prix des métaux tels que l'indium ou le cadmium est également variable, on trouve les références de prix mensuels dans le Metal Bulletin, qui servent souvent de références pour les contrats de vente.

[9]Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals.

de l'acide sulfurique. Cet acide représente le principal produit dérivé de la transformation du concentré de zinc (SCF), puisqu'on obtient en moyenne 1.3 unités d'acide sulfurique par unité de zinc produite. Par exemple, en 2009, la raffinerie *CEZinc* au Canada a été obligée de réduire sa production du zinc. Enn effe, «son mandataire Xstrata Canada Corporation a avoué son incapacité de vendre et de stocker l'acide sulfurique dans des quantités équivalentes au taux actuel de production. Par conséquent, la production au mois de mars sera réduite de 4800 tonnes de zinc et 8000 tonnes d'acide sulfurique.»[10].

Cependant, tous les concentrés ne se valent pas car certains transformateurs vont préférer un concentré ayant des caractéristiques bien précises. Cette préférence se justifie par des différences du processus de transformation mais aussi par le cadre réglementaire régissant ce processus (notamment les normes environnementales). A titre d'exemple, le procédé pyrométallurgique permet d'obtenir un meilleur taux de recouvrement à partir du minerai contenant du sulfure de cuivre et de fer. Le procédé hydrométallurgique nécessitera quant à lui, plutôt des oxydes des minéraux récupérables et non récupérables. Le transformateur doit alors trouver des partenaires commerciaux proposant un concentré correspondant à ses besoins spécifiques.

Tandis que les concentrés sont assez hétérogènes, le zinc métal produit par le transformateur doit être strictement conforme aux normes relatives au contenu des impuretés. En fonction de la proportion des impuretés, on distingue le zinc de haute pureté "SHG", *Special High Grade* utilisé comme référence dans les contrats LME et contenant 99,995% de zinc. Le métal moins pur est connu sous l'appellation "HG", *High Grade* et est vendu avec une certaine décote par rapport au prix LME. Ainsi, les transformateurs privilégient l'achat de concentré conforme aux limites d'impuretés afin de produire un zinc de haute pureté.

Lorsque le transformateur n'a pas la possibilité d'acheter du concentré de bonne qualité, il peut éventuellement procéder au panachage de concentrés de différentes origines. Ce procédé permet de compenser le niveau des impuretés afin d'obtenir du zinc SHG à partir d'un concentré avec impuretés et certains éléments au-dessus des limites autorisées. Le tableau A.4, annexe A, reprend le contenu métallique de neuf concentrés analysés par Boyanov *et al.* (2011). Les auteurs ont cherché identifier les proportions du mélange des concentrés contenant des impuretés pour obtenir le métal conforme aux spécifications de SHG.

De plus, les opérations de transformation comportent des coûts fixes importants liés au démarrage de l'activité. Un arrêt de production à cause d'un manque de concentré implique un coût très élevé, c'est la raison pour laquelle la gestion des flux des approvisionnements est d'une importance cruciale pour le transformateur (Sylwestrzak *et al.*, 2009). L'écoulement

[10](JSF, 25 février 2009)

du métal produit représente une autre contrainte en termes de flux de matière. Les sites de transformation ne sont pas adaptés au stockage de quantités importantes de métal, obligeant ainsi les transformateurs à réaliser leurs ventes de métal dans le cadre de contrats de long terme.

Le positionnement des transformateurs au sein de la filière est assez complexe car la continuité de leurs opérations dépend de la bonne organisation des flux d'approvisionnement et de la demande de métal produit. Ce positionnement spécifique s'explique par la dichotomie existante entre les sites miniers et les sites de transformation qui font partie de la filière de production du métal, détaillée dans la partie suivante.

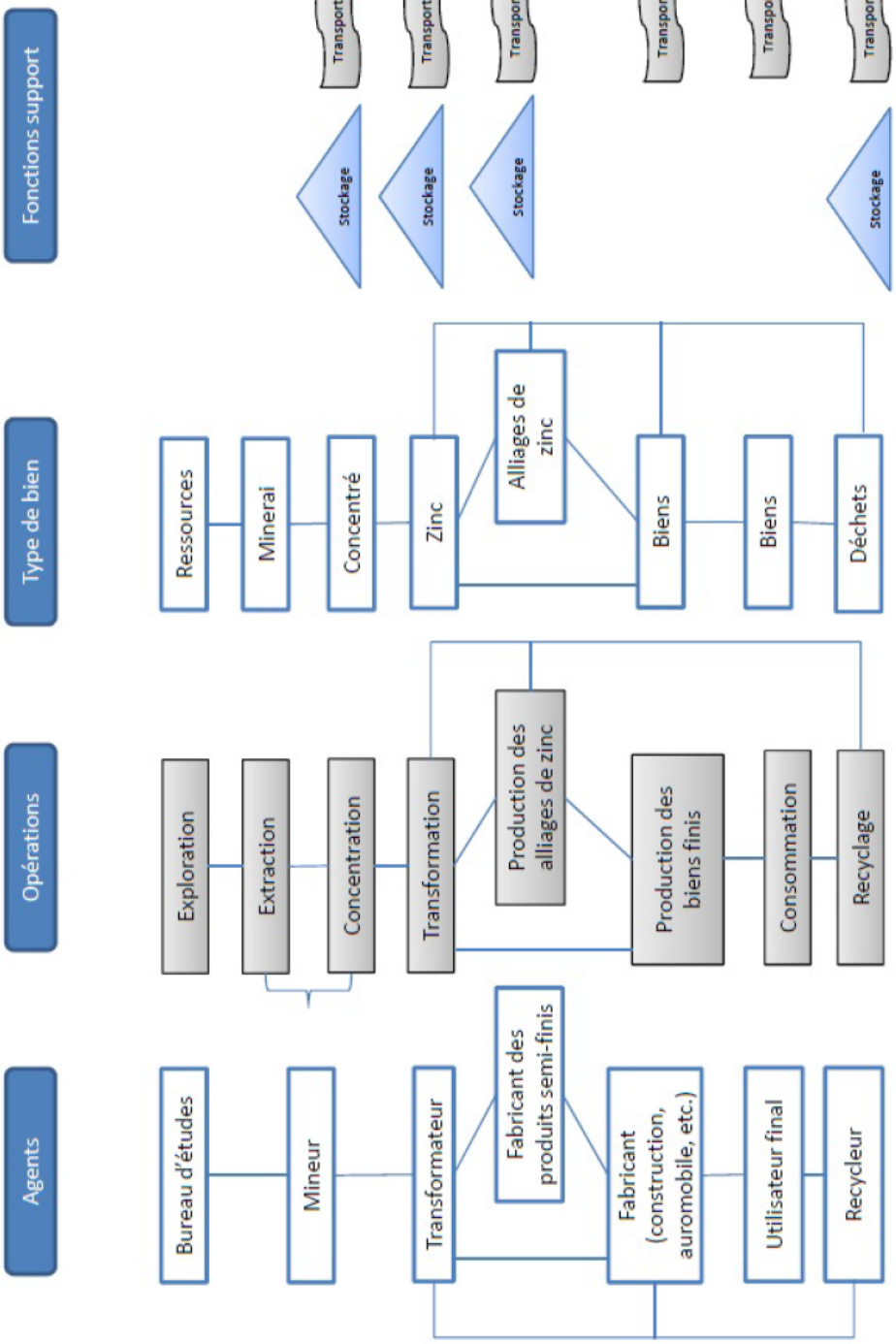
I.2.3 Filière type et choix de la localisation

Dans cette partie nous présentons d'abord le schéma général de la filière de la production et consommation du métal en passant en revue les acteurs intervenant aux différentes étapes de la production et de la consommation de zinc (schéma 1.6).

La production et la consommation de zinc fait intervenir plusieurs types d'agents. Les opérations en amont de la filière consistent en un travail d'exploration des gisements qui est réalisé par les bureaux d'études. Le projet minier aboutit alors à l'exploitation du gisement par la société minière (mineur) qui réalise les opérations d'extraction du minerai et de concentration pour obtenir le concentré. Ce dernier peut ensuite être transporté jusqu'au site de transformation où le transformateur procède à 'obtention du zinc métal. Le concentré et le métal peuvent être consommés immédiatement ou bien stockés dans un entrepôt ou chez un négociant. De manière similaire il est possible de produire des alliages de zinc à partir du métal pur. Le zinc métal et les alliages du zinc sont ensuite transportés jusqu'aux fabricants industriels[11].

L'utilisateur final consomme des biens où le zinc rentre en tant que composant de fabrication. L'ultime étape présentée est le recyclage, le recycleur renvoi les déchets au transformateur pour une réinsertion dans le cycle au niveau du zinc métal, il s'agit de la transformation secondaire du métal. Compte tenu de l'objet de notre étude, nous détaillons uniquement les opérations en amont de la filière présentée, à savoir les opérations réalisées par le mineur, le transformateurs et les interactions de ce dernier avec les consommateurs de zinc. Ceux-ci sont considérés comme consommateurs finals indépendamment du nombre d'intermédiaires séparant l'utilisateur final du transformateur).

[11] Le zinc est utilisé principalement dans le secteur de construction, l'industrie automobile en tant que revêtement anti-corrosion.



Graphique 1.6: Filière type de la production et de la consommation de zinc

Source : Auteur

La revue des firmes intervenant dans les échanges de concentré nous a permis de confirmer l'absence d'intégration verticale systématique des firmes minières et transformatrices, à la différence de l'unité mine/transformation constatée au XIXème siècle. La dissociation géographique croissante entre sites de mine et sites de transformation associée à l'hétérogénéité du produit constituent aujourd'hui l'obstacle principal à une possible intégration verticale de la filière. Les mineurs et les transformateurs sont deux types de firmes identifiés ayant des agendas différents. Néanmoins, ces firmes restent les maillons interdépendants de la même filière ce qui crée un besoin de coordination de leurs activités. Pour autant cette coordination reste complexe en raison des différentes stratégies individuelles choisies par les firmes.

A l'échelle de la filière, les firmes font face à des contraintes liées à leur situation géographique et à la nature de leurs activités. Les mines sont des entités "fixes", leur localisation est conditionnée par l'existence de gisements en minerai. Les transformateurs sont des entités "semi-fixes". Ils peuvent éventuellement se relocaliser, mais à un coût (fixe) suffisamment élevé pour que ces changements soient très rares. Les contraintes des mineurs sont liées : 1) à l'hétérogénéité du concentré produit, 2) au besoin de sécuriser un débouché constant pour le concentré produit afin d'éviter l'engorgement de la mine et 3) à la rentabilisation des opérations de la mine sur toute sa durée de vie.

L'agenda du transformateur est déterminé par des contraintes liées : 1) à l'usage d'un concentré ayant des caractéristiques précises[12], 2) au besoin de sécuriser un approvisionnement constant de ce concentré et 3) au besoin de vendre le métal ainsi produit. La localisation des transformateurs et la technologie utilisée déterminent la structure des coûts et deviennent un facteur de différenciation (les coûts de main-d'œuvre et les coûts d'énergie sont les deux principaux postes de dépenses des transformateurs).

Cette présentation synthétique de la filière de production du métal et des jalons de son évolution permettent de rendre compte de la complexité des relations entre les firmes au sein de cette filière. Les contraintes de production ont créé un besoin de contrôle des flux de matière (approvisionnement) et ont débouché sur une recherche de partenaires commerciaux fiables et fidèles[13]. La spécialisation progressive des activités, associée à l'éloignement géographique des firmes de la filière a vu naître de nouveaux besoins en coordination qui n'existaient pas auparavant.

[12]Lui permettant ainsi d'améliorer le rendement du processus de transformation en limitant les pertes en métal.

[13]Ce phénomène a été largement détaillé par Dées *et al.* (2007) sur l'exemple du marché du pétrole.

Sur la base de ce constat, nous proposons cinq déterminants fondamentaux du rapport de force au sein de la filière :

- L'hétérogénéité des concentrés
- La sécurité des approvisionnements
- Les coûts de main d'œuvre
- Les coûts d'énergie
- Les coûts de transports

Le fonctionnement des firmes géographiquement distantes au sein de la filière crée ainsi un besoin de coordination issu des contraintes communes mais aussi individuelles. Les mineurs doivent intégrer dans leurs agendas la nécessité de sécuriser l'écoulement du concentré, qui d'ailleurs est très hétérogène. Les transformateurs font face aux contraintes de sécurisation des approvisionnements ainsi qu'à des différences individuelles de coûts de production (énergie et main-d'œuvre) auxquels s'ajoute le coût de transport. Nous détaillons d'abord la gestion des contraintes individuelles liées à l'hétérogénéité du concentré pour le mineur et aux différences en termes des coûts pour les transformateurs. Nous passons ensuite à la présentation des contrats de long terme qui permettent la coordination des flux matière, contrainte commune aux mineurs et aux transformateurs.

Les différences individuelles constatées entre les mineurs viennent de la qualité du gisement, de la localisation des mines et de la durée de vie des mines exploitées. L'hétérogénéité du concentré et les différentes techniques de transformation laissent suffisamment de place à une spécialisation des firmes au sein de la filière. Ainsi, en raison de la spécificité du concentré produit, les mineurs de petite taille peuvent être des partenaires commerciaux de poids pour les grands transformateurs. De cette manière, les besoins des transformateurs en concentré hétérogène sont satisfaits grâce à l'existence de nombreux mineurs fournissant le concentré de composition différente.

Le tableau 1.2 correspond à la qualité du concentré spécifiquement recherchée par le transformateur *Lisheen*. En plus des éléments standard de valorisation, le contrat exige la présence de certains éléments complémentaires. Une composition spécifique est demandée par le transformateur dans le cas où son procédé de fabrication requiert un mélange de concentrés de composition variée. Ce genre de spécifications de l'appel d'offre réduit sensiblement le nombre d'offreurs et crée des obstacles à l'intégration verticale des firmes.

Tableau 1.2: Composition du concentré spécifique recherché par la société Lisheen Milling Ltd

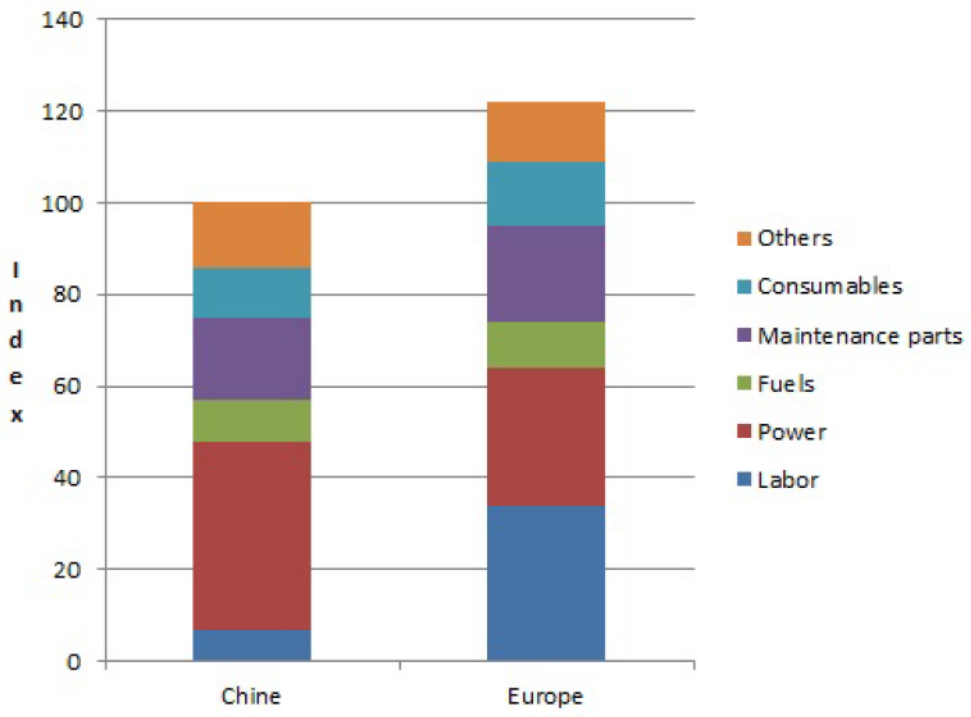
Element	Symbole	Dosage
Zinc	Zn	52.00% - 55.00%
Fer	Fe	4.00% - 7.00%
Cobalt	Co	100 ppm - 300 ppm
Cadmium	Cd	0.06% - 0.23%
Cuivre	Cu	0.05% - 0.24%
Plomb	Pb	1.0% – 3.50%
Argent	Ag	40 - 200 grams/ton
Manganèse	Mn	0.01 - 0.04%
Magnesium Oxide	MgO	0.20 - 0.70%
Silicium	Si02	0.70 – 1.10%
Soufre	S	27 - 35%
Chlorine	Cl	200 - 500 ppm
Arsenic	As	0.10 - 0.25%
Nickel	Ni	200 ppm – 1000 ppm
Eau	H20	7.50% – 9.80%

Source : Lisheen Milling Ltd.

A la différence des sites miniers localisés près des gisements, les sites de transformation peuvent être localisés suivant une logique de réduction des coûts. Ainsi, le choix géographique de la localisation des sites de transformation est conditionné à la fois par l'existence des infrastructures de transport afin de limiter les aléas liés au transport des matières mais aussi par des calculs liés aus coûts opérationnels. La structure des coûts devient alors le facteur de différenciation des transformateurs. Il s'agit principalement d'une différenciation entre des pays à bas coût de main d'œuvre et les pays dont la main-d'œuvre représente une partie des coûts plus importante.

La dernière variable à considérer est celle du coût de transport : le transformateur peut choisir de se rapprocher des foyers de consommation, où la main-d'œuvre est plus chère et l'infrastructure meilleure, ou viser des zones plus proches des mines. Le coût de production des transformateurs chinois est d'environ 22% inférieur au coût de production des transformateurs européens (graphique 1.7). Cette différence s'explique principalement par l'écart entre le coût de la main d'œuvre en Europe et en Chine. En Europe, environ 28% du coût total de production est imputable à la main-d'œuvre, alors qu'en Chine cette valeur s'établit à 8%. Le deuxième poste important de dépense est le coût de l'énergie. La relation précédente s'inverse quand il s'agit du coût de l'énergie. En effet, 42% des coûts de production des transformateurs chinois sont alloués à l'énergie, alors que pour les transformateurs européens cette valeur est de l'ordre de 25%.

Graphique 1.7: Comparaison des coûts de transformation en Europe et en Chine



Source : Tuominen et Kojo (2005)

Les différences en termes du taux d'imposition sont un autre facteur décisif de la localisation des firmes. La majorité des pays riches en ressources sont unanimes dans l'application de divers outils fiscaux sur les bénéfices tirés des ressources naturelles. Les outils fiscaux les plus utilisés sont les taxes à l'exportation, les taxes sur le chiffre d'affaires des sociétés minières et les impôts spéciaux visant à limiter l'exploitation des ressources situées sur le sol national (tableau 1.3).

Les redevances minières varient en fonction du type du minerai extrait et du niveau de profit obtenu lors de l'extraction. Nous joignons dans l'annexe le tableau comparatif des taxes sur le cuivre appliquées par un certain nombre de pays producteurs de cuivre (tableau A.5 annexe A). Il s'agit de la taxe minérale (*mineral tax*) qui s'applique dans la plupart des cas à la valeur de marché du minerai extrait. La prise en compte des contraintes fiscales devient alors un des facteurs de décision lors de l'ouverture de nouvelles mines.

Les contraintes de transport qui pèsent sur les firmes nécessitent une attention particulière quant à l'organisation des flux des matières. Il s'agit non seulement du coût de transport, mais aussi de la disponibilité des containers cargo dans certaines zones géographiques (ex. tensions sur la disponibilité des containers en Chine). La prise en compte du transport dans les transactions fait ressortir l'importance de la localisation des firmes transformatrices. Cette différenciation entre les transformateurs en fonction de leur pays de localisation crée des seuils de rentabilité

Tableau 1.3: Redevances minières et impôts sur les sociétés pour une sélection de pays

Pays	Redevance minière, %	Impôt sur les sociétés
Argentine	21%	35%
Australie	30%	30%
Brésil	15%-25%	34%
Canada	25%	10%-16%
Chili	30%	18.50%
Chine	10%	25%
Congo (Rép.Dém.)	14%	30%-40%
Allemagne	15.83%	7%-15,8%
Ghana	10%	25%-35%
Inde	10.50%	33,45%-42,02%
Indonésie	20%	25%
Kazakhstan	15%	20%
Mexique	25%	30%
Pérou	30%	30%
Philippines	30%	2%-30%
Russie	20%	15,5%-20%
Afrique du Sud	12%	28%
Royaume Uni	20%	26%
Etats-Unis	30%	4%-35%

Source : PricewaterhouseCooper (2012)

et de fermeture différents selon les transformateurs.

La gestion des flux matière est une contrainte commune aux mineurs et aux transformateurs. L'un des outils de coordination des flux matière sur les marchés des matières premières est la conclusion des contrats à long terme. Il s'agit des contrats conclus pour une durée assez importante, d'une dizaine années, qui assurent aux contreparties une continuité des transactions dans le temps. Par ailleurs, la conclusion de ces contrats permet de structurer les relations entre les firmes au sein de la filière par la création d'une relation commerciale de longue durée.

On trouve ce type de contrats dans l'industrie minière, dans l'industrie pétrolière et sur les marchés des matières premières périssables. Les industries où sont utilisés ce type de contrats sont souvent caractérisées par un nombre limité d'acheteurs et de vendeurs rendant ainsi le coût de renégociation élevé car le nombre de partenaires commerciaux alternatifs est réduit. Naturellement, les contrats à long terme sont construits de telle manière que la continuité des opérations est possible même lorsque les parties n'arrivent pas à se mettre d'accord sur le prix.

Le contrat à long terme sur le concentré de zinc permet au transformateur de gérer son flux de concentré tout en sécurisant les quantités achetées. Les flux sortants sont également prévisibles et peuvent faire l'objet d'un autre contrat de long terme. Le mineur optimise sa

production sur la base des contrats de vente à long terme. Ccet engagement lui permet de déployer sa stratégie d'exploitation de la mine notamment en ce qui concerne les volumes à produire pour rentabiliser les opérations.

Afin de garantir au contrat de long terme un caractère durable et ainsi éviter le risque de dénonciation du contrat, les parties prévoient des clauses d'incitation assurant une renégociation quasi-certaine en cas de changements majeurs. Trois types de clauses d'incitation sont identifiés dans Goldberg et Erickson (2013) : des clauses d'indexation, des clauses de renégociation et des mécanismes hybrides. La clause d'indexation autorise de modifier le prix des transactions en fonction des variations du prix de référence. Ce mécanisme permet aux firmes d'éviter les problèmes de vente à perte lorsque les conditions du marché évoluent.

La clause de renégociation prévoit l'existence des périodes de négociations (par exemple, les négociations annuelles) où les parties peuvent revoir un certain nombre de paramètres du contrats. Ce type de clauses présente de l'intérêt lorsque la structure du marché change. Ainsi les firmes peuvent négocier les conditions de prix plus intéressantes ou bien faire appel à des fournisseurs et des clients alternatifs. Quant auxs mécanismes hybrides, ils comportent des clauses d'indexation et de renégociations, souvent associés à des seuils minimum et maximum de fluctuations pour limiter le nombre de renégociations.

Cependant, la conclusion des contrats à long terme pour la totalité de l'approvisionnement ou de la production présente un certain nombre de risques opérationnels liés à la bonne exécution de ces contrats (arrêt imprévu des opérations, problèmes de production, grève, etc). Pour cette raison, une partie des volumes achetés et/ou produits fera objet des contrats de court terme (contrats spots) qui permettront aux firmes de procéder aux ajustements de quantités tout en limitant le risque opérationnel lié aux contrats de long terme.

Globalement les contrats à long terme peuvent être considérés comme les exemples des accords de distribution de profits et ils sont conclus en fonction du pouvoir du marché, des conditions techniques ainsi que des préférences des agents. En revanche, cette solution n'est pas suffisamment adaptée aux marchés en présence des firmes de taille variable. En effet, même si le contrat conclu représente une assurance pour sécuriser les flux de firmes, la conclusion du contrat entre les firmes de taille inégale expose le petit contractant au risque de la contrepartie. Selon les travaux de Goldberg et Erickson (2013) les contrats de long terme sont moins utilisés pour la gestion du risque mais plutôt en tant que levier de renégociation du prochain contrat. En cohérence avec ce constat, la filière de la production du métal s'est dotée d'outils complémentaires assurant la coordination entre les firmes de taille variable et possédant des agendas différents voire disparates. C'est de cette difficile équation qu'est née la *Treatment Charge*.

II La TC dans le cadre du contrat du concentré

Nous commençons cette section par l'identification de trois types de clauses dans le contrat du concentré. Tout d'abord il s'agit des clauses standard propres à tout type de contrat commercial sur les matières premières ; vient ensuite la TC dont nous détaillons les propriétés, enfin nous présentons les éléments spécifiques du contrat de concentré.

La TC tient une place à part dans le contrat du concentré grâce à son caractère négocié, elle reste néanmoins une variable dont le rôle économique est mal identifié. Sur la base de ce constat nous proposons deux hypothèses de travail visant une meilleure compréhension de la TC. Ces hypothèses de travail correspondront au fil conducteur de la seconde partie de ce chapitre et du chapitre 2.

II.1 La présentation du contrat

Dans cette partie nous détaillons les trois types de clauses de contrat du concentré en fournissons des illustrations de leur fonctionnement. Après une présentation rapide des clauses standard, nous passons à l'introduction de la TC en tant qu'élément négocié du contrat du concentré. Enfin, nous détaillons les clauses spécifiques propres aux transactions sur le concentré métallique. Nous définissons le contrat de concentré comme *un document contractuel par lequel le mineur s'engage à fournir le concentré au transformateur*. Ce contrat a pour objet le transfert de propriété en échange du paiement du prix du concentré associé.

II.1.1 Contrat du concentré et ses clauses standard

Les clauses standard correspondent aux clauses que l'on trouve dans la plupart des contrats concernant les matières premières. Ces clauses permettent d'identifier l'objet de la transaction et de détailler les principaux éléments rentrant en compte pour l'identification du prix. Les éléments du contrat de base sont :

1. **La quantité de concentré (tonnage)**
2. **La règle de fixation du prix**
3. **Le coût de transport**
4. **La prime**
5. **La formule de valorisation du concentré**

Nous détaillons ces éléments ci-dessous.

Tonnage

La quantité de concentré qui fait l'objet d'une opération de vente est exprimée en tonnes «humides» (*wet metric ton*). On y tient compte de l'humidité du concentré transporté (entre 8% et 10%). Le poids du concentré «sec» (*dry metric tons*) sert de base pour les calculs de prix :

$$DMT = (1 - H_2O\%) * WMT \tag{1.1}$$

Avec DMT le poids du concentré sec, en tonnes, WMT le poids du concentré humide, en tonnes, $H_2O\%$ le taux d'humidité, en pourcentage. L'humidité du concentré est mesurée lors de l'échantillonnage par un laboratoire indépendant. Le poids du concentré expédié peut cependant s'écarter légèrement du poids du concentré vendu (+/- 5%) en raison de la difficulté de charger la quantité exacte au kilogramme près. Pour éviter toute contestation, on considère que le poids final du concentré vendu est celui déterminé par le transporteurqui figure dans le connaissement maritime.

Fixation du prix

Le contrat du concentré stipule la formule de valorisation, mais ne renseigne pas sur le prix final de la transaction. Le contrat est alors conclu à un prix inconnu ("prix à fixer"). Le prix final sera déterminé au moment de la vente ou même plusieurs mois après la livraison en utilisant le prix LME (voir l'encadré 1.1). Comme la plupart des contrats exigent un prépaiement, celui-ci est calculé sur la base d'un prix provisoire et du tonnage estimé de concentré. Ce prépaiement permet la passation du titre de propriété du vendeur à l'acheteur. Ainsi, le paiement final intervient lorsque le poids est connu et le prix est fixé.

Encadré 1.1: Fixation du prix

Il s'agit du contrat avec un prix à fixer lorsque le mineur et le transformateur conviennent d'un prix de vente déterminé à une date (période) future donnée, appelée période de cotation, sur le marché LME. Lorsque le volume à valoriser est faible, la cotation se fait souvent sur la base du prix journalier. Pour des contrats à volumes importants, on a recours à la fixation du prix sur la moyenne de la semaine ou du mois. Lorsqu'il s'agit des contrats de long terme (annuels), la fixation est souvent associée à la livraison, ainsi on utilisera la moyenne du mois en cours pour la livraison du mois en cours ou du mois suivant. Par exemple, le prix de 30 000 tonnes livrées en mars peut être fixé sur la moyenne du prix du mois de mars ou sur la moyenne du prix du mois d'avril. L'autre possibilité est de fixer le prix de 30 000 tonnes sur les trois mois, de mars à mai, avec un éclatement par 10 000 tonnes fixées sur le moyenne de chaque mois.

Transport

Le concentré est transporté en sacs ou en containers sur décision conjointe du mineur et du transformateur. La transmission du titre de propriété s'effectue sur la base des incoterms 2010, l'incoterm CIF (*Cost Insurance et Freight*) étant le plus souvent utilisé. L'organisation du transport est à la charge du vendeur : celui-ci supporte les frais de transport et assure la marchandise jusqu'au port d'arrivée. Le mineur refacture au transformateur les coûts liés au transport du concentré, ainsi que le coût d'analyse des échantillons pour valider la composition du concentré.

Prime

La prime ou "premium" est appliquée au prix final du concentré sous forme de décote ou de majoration en fonction de la localisation de la marchandise et de sa disponibilité. On utilise souvent les noms des grands ports internationaux de référence associés à l'incoterm de vente (ex. FOB Rotterdam, CIF Chennai, etc.)[14]. Les mineurs situés loin des ports européens doivent être prêts à accepter une décote appliquée au prix de vente du concentré transporté en Europe.

[14]Rotterdam, Pays-Bas, est le port où la prime est nulle.

Inversement, le concentré disponible à proximité des ports européens aura un décote très faible. A l'achat, la prime correspond à une majoration du prix d'achat en fonction de la disponibilité de la marchandise et du lieu d'acheminement.

La différence entre les primes est la principale source de profit des négociants. Ceux derniers achètent le concentré disponible dans une zone éloignée avec une décote importante (décote à l'achat) et vend ensuite ce concentré dans une autre région éloignée d'Europe avec une prime (prime à la vente) (voir l'encadré 1.2).

Encadré 1.2: Primes appliquées

On peut détailler ce mécanisme comme suit, le concentré acheté au Pérou va être valorisé sur la base suivante : valorisation LME-80$/t[a], 80$/tonne correspondent à la décote à l'achat et ce montant correspond aux frais de transport et à la prime de disponibilité jusqu'à un port européen. A l'inverse, lorsque ce concentré est vendu en Chine, il sera vendu avec une prime de +100$/tonne qui correspond aux coûts de transport jusqu'à destination et à la prime de disponibilité. La prime permet de juger de la disponibilité du concentré dans une zone géographique donnée, elle sera d'autant plus élevée que la pénurie du concentré dans une localité donnée[b].

[a] Le montant de prime est donné à titre d'exemple et ne reflète pas la réalité du marché.

[b] Cet arbitrage est assez fréquent sur le marché du métal. Selon Angel et Bhal (2012) en mai 2012 la société Glencore a mis en place une stratégie consistant à stocker tout le zinc disponible dans les entrepôts de la Nouvelle-Orléans, plutôt que de stocker en Europe le surplus de production du zinc obtenu à *Asturiana de Zinc*, unité de production de Glencore en Espagne. Cette stratégie a permis à Glencore de créer une pénurie de zinc disponible en Europe et de provoquer une hausse des primes pour les livraisons du zinc en Europe.

Formule de valorisation du concentré

Le prix du concentré est une indication de la valeur globale du concentré au moment de la transaction. Il s'obtient alors à partir de la formule suivante :

$$V = \sum_{n}^{i=1}(P_{Mi} - RC) * (Mc_i * d_i) - (TC + (PZn - PZnB) * Scale) - \sum_{n}^{i=1} P_k \qquad (1.2)$$

Avec V la valeur d'une tonne de concentré, P_{Mi} le prix spot du métal i, $i = 1, ..., n$ le nombre de métaux utiles contenus dans le concentré, RC la charge de raffinage annuelle[15], TC la charge de traitement annuelle, Mc_i le contenu en métal i, d_i le métal payable ou déduction unitaire, $PZnB$ le prix du zinc de base associé à la TC annuelle, PZn le prix du zinc spot, $Scale$ le coefficient de variation de la TC et Pk la pénalité associée au dépassement des limites du

[15] La charge de raffinage (RC) est une charge supplémentaire, utilisée uniquement pour la valorisation du concentré du cuivre du grade élevé. C'est la raison pour laquelle nous ne faisons pas référence à la charge de raffinage dans la suite de notre travail. Une étude de la charge de raffinage pourrait constituer une piste de recherche intéressante pour compléter notre travail.

contenu en métal k, avec $k = 1, ..., m$ les métaux donnant lieu à des pénalités[16].

La première partie de la formule $(\sum_n^{i=1}(P_{Mi} - RC) * (Mc_i * d_i))$ permet de valoriser les métaux contenus dans le concentré. En plus du métal principal, le concentré de zinc peut contenir du plomb, de l'argent, de l'or qui seront extraits lors de la transformation. Chaque métal est valorisé en fonction de son contenu métallique auquel on applique une déduction forfaitaire (métal payable) pour tenir compte des pertes du métal lors de la transformation. La deuxième partie de la formule $(TC + (PZn - PZnB) * Scale)$ correspond au calcul de la *Treatment Charge* (TC). On applique les coefficients de variation *Scale* en fonction de l'écart entre le prix du métal du jour et le prix du métal annuel associé à la TC de base. La dernière partie $(\sum_n^{i=1} P_k)$ permet le calcul des pénalités dues à la présence de métaux non-désirés.

Plusieurs remarques peuvent être faites quant aux éléments composant cette formule. En effet, la formule de valorisation semble répondre à un objectif de parcimonie dans la comptabilisation de la totalité des éléments contenus dans le concentré. Ainsi, les métaux "utiles" sont valorisés, tandis que la présence des métaux non-désirés est pénalisée. La complexité de la formule reflète son caractère adapté à la valorisation du concentré hétérogène, permettant ainsi aux firmes de trouver un terrain d'entente sur le prix à payer. On remarque également que la TC correspond à une déduction variable, dont nous allons maintenant détailler la formule de calcul.

II.1.2 La TC : pièce maîtresse du contrat du concentré

La Treatment Charge (TC) s'applique systématiquement à chaque tonne du concentré vendu à l'aide du contrat de concentré standard basé sur la formule de valorisation. Elle est exprimée en $/tonne du concentré valorisé. On distingue deux types de TC : la *TC de base* (ou TC annuelle) et la *TC réalisée* (ou TC spot ou TC calculée).

La TC de base est la TC fixée lors des négociations annuelles : elle s'applique pour la valorisation du concentré pour l'année civile en cours. La valeur de la TC de base est associée à la fois à un niveau du prix de zinc ainsi qu'aux coefficients de variation de la TC. Ces éléments font également l'objet de négociations et représentent un consensus des firmes sur le niveau du prix moyen annuel espéré du zinc et ses variations. Le prix du zinc associé à la TC de base est alors appelé *prix de zinc de base*. Les coefficients de variation sont appliqués quand le prix réel du zinc sur le marché (prix spot) s'écarte du prix du zinc de base (voir l'encadré 1.3).

[16] Ces métaux donnent lieu à une pénalité car ils compliquent le processus de transformation. Lorsque le contenu en autres métaux dépasse la proportion admise, on applique une pénalité proportionnelle au niveau du dépassement.

Quand le prix spot est supérieur au prix du zinc de base on parle de coefficient de variation à la hausse (ang. *escalator*), à l'inverse le coefficient de variation à la baisse (ang. *descalator*)[17] est appliqué quand le prix du métal spot est inférieur au prix du zinc de base. La TC obtenue après l'application des coefficients de variation est appelée la TC réalisée (spot ou calculée). A la différence de la TC de base, qui sert de référence, la TC réalisée est appliquée au calcul du prix final du concentré.

La valeur de la TC de base appliquée aux contrats de 2015 est de 245 $/tonne de concentré associée à un prix du zinc de base de 2000 $/tonne. Ce niveau de la TC est cependant supérieur à celui de 2014 où la TC de base était de 223 $/t pour le même prix du zinc de base. En ce qui concerne la TC de base en 2013 et en 2012, associée au même niveau du prix de zinc de base de 2000 $/t, elle était respectivement de 210.5 $/t et 191 $/t. En conséquence, depuis quatre ans, le niveau de la TC de base croit tout en étant associé au même niveau de prix du zinc de base.

Encadré 1.3: Application des coefficients de variation de la TC

$$\mathrm{TCR} = \mathrm{BTC} + (\mathrm{PZn} - \mathrm{PZnB}) * \mathrm{Scale} \tag{1.3}$$

Lorsque le prix du métal spot est supérieur au prix du métal de base, la TC réellement payée (TCR) sera supérieure à la TC de base (BTC) :

$$\text{si} \quad PZn > PZnB, \quad \text{alors} \quad TCR > BTC \tag{1.4}$$

Lorsque le prix du métal spot est inférieur au prix du métal de base, la TC réellement payée est plus faible que la TC de base :

$$\text{si} \quad PZn < PZnB, \quad \text{alors} \quad TCR < BTC \tag{1.5}$$

Par exemple, considérons un prix de base ($PZnB$) à 1000 $ /t et une TC de base (BTC) de 100 $ /t. Si le prix spot de zinc PZn est de 1200 $ /t, on applique le coefficient de variation à la hausse. Supposons que ce coefficient est de 12 %, dans ce cas la TC réalisée est de $100 + (1200 - 1000) * 0,12 = 100 + 24 = 124$ $ /t.

Le prix moyen de zinc en 2014 s'est établi à 2164 $/t, ce qui permet d'obtenir une TC annuelle réalisée de 237 $/t. La TC réalisée en 2012 et en 2013 a été plus faible, 190 $/t et 209 $/t respectivement pour un prix de zinc moyen de 1946 $/t et 1909 $/t. Ainsi, en 2012 et 2013

[17] Les coefficients de variation peuvent être associés à des seuils de prix afin de limiter les variations de la TC réalisée. Ainsi, le termes de valorisation pour l'année 2015 prévoient un coefficient de variation de 9% dans le cas où le prix de zinc se situe entre 2000$/t et 2500 $/t, 8% si le prix de zinc se situe entre 2500 $/t et 3000$/t, 5% si le prix de zinc se situe entre 3000 $/t et 3750 $/t et 0% pour le prix de zinc supérieur à 3750. Le coefficient à la baisse est fixé à 3.25 % pour un prix de zinc entre 2000 $/t et 1500 $/t et 0% pour un prix de zinc inférieur à 1500 $/t.

la TC réalisée est presque identique à la TC de base, mais en 2014 la TC réalisée est supérieure à la TC de base de 14 $/t.

Pour autant, en dehors de la TC, d'autres clauses spécifiques du contrat de concentré complètent le cadre de transaction entre mineurs et transformateurs. Il s'agit de la déduction unitaire, des règles et des pénalités régissant la composition du concentré.

II.1.3 Eléments spécifiques de la valorisation du concentré

Sous "éléments spécifiques" du contrat du concentré nous entendons les clauses du contrat propres aux transactions sur le concentré. Leur application répond aux besoins spécifiques de la filière, et elles traduisent les contraintes de production des transformateur. Ces clauses visent à faire payer au vendeur du concentré les coûts supplémentaires liés à la transformation du concentré hors normes en termes de la proportion des métaux contenus.

Déduction unitaire

La déduction unitaire correspond à une réduction forfaitaire d'une partie du contenu métallique payé par le transformateur. Il s'agit d'une convention historique qui autorise le transformateur à payer moins de métal que le concentré n'en contient. Deux règles de calcul alternatives peuvent y être appliquées : les "85% du métal payable" et la "règle de la déduction minimale". Ces règles sont presque équivalentes en terme de résultat, le transformateur et le mineur choisissent alors l'une des règles de calcul au moment de la conclusion du contrat (voir l'encadré 1.4).

La règle de "85% du métal payable" détermine la proportion du métal qui sera payée au mineur, les 15% restants sont offerts au transformateur. La valeur de 85% correspond au taux de recouvrement historique et elle est utilisée jusqu'à aujourd'hui malgré l'amélioration du taux de recouvrement actuel pour la plupart des transformateurs. Le mineur et le transformateur peuvent également utiliser la règle de la "déduction minimale". Dans ce cas, ils appliquent une déduction de 8% du contenu métallique du zinc[18].

La valeur de la déduction unitaire pour 2015 est de 8 unités (pourcents) pour le concentré de zinc, de 1.1 unités (pourcents) pour le cuivre dans le concentré de cuivre et elle varie de 1.5 à 3 unités (pourcents) pour le concentré de plomb. Le même type de règle de calcul s'applique au contenu en argent (Ag) et en or (Au) où il existe des valeurs de métal payable associée aux

[18]La valeur de 8% correspond à une convention historique dont la justification n'est pas clairement identifiée dans la littérature.

valeurs des déductions minimales. Les deux sont exprimées en onces d'or ou en onces d'argent. Les autres métaux tels que l'indium (In) ou le cadmium (Cd) peuvent également faire partie de ce calcul si leur contenu est important : les déductions sont alors exprimées en grammes.

Encadré 1.4: Application de la déduction unitaire

Le zinc dont le contenu métallique est de 53% sera payable à hauteur de 45% du zinc contenu dans le métal, ce qui correspond au métal payable à hauteur de 85%. L'exemple proposé montre que l'application des deux méthodes de calcul donne des résultats similaires. Si les deux règles de calcul donnent des résultats légèrement différents (en raison des arrondis) c'est le chiffre le plus bas qui est retenu pour la valorisation.

$$\text{Zn Payable} = 0,85 * (53)\% = 45\%$$
$$\text{Min Deduction Zn} = (53 - 8)\% = 45\%$$

Le mécanisme de déduction unitaire permet de compenser les pertes du transformateur lors d'opérations de transformation. Par ailleurs, cet outil aide à gérer les contraintes de la transformation, car la production du métal à partir d'un concentré moins pur implique des opérations et des coûts supplémentaires. Le mineur qui ne souhaite pas être fortement pénalisé par l'application de la règle de déduction unitaire est alors incité à trouver des solutions pour enrichir davantage sont concentré et par conséquent, à rendre plus efficace le fonctionnement de la filière de production.

Pénalités

Les pénalités sont appliquées si des éléments chimiques indésirables sont présents dans le concentré. Le montant des pénalités est établi en dollars par pourcent de dépassement du contenu maximal acceptable[19]. L'objectif des pénalités est de faire supporter au mineur les coûts relatifs à la séparation de ces éléments du métal principal ainsi que les coûts relatifs au recyclage/dépôt de ces éléments (notamment dans le cas des substances dangereuses et/ou celles visées par la règlementation environnementale). Il s'agit entre autres, des substances telles que le plomb, le fer, le dioxyde de silicium, le germanium, l'antimoine, l'arsenic, le chlore, l'oxyde de calcium, le fluor. Les pénalités sont déclenchées lorsque le contenu de ces substances dépasse les seuils de tolérance imposés. Ainsi, la présence des pénalités dans le contrat de concentré permet de dissuader certains mineurs de fournir un concentré de mauvaise qualité. Les pénalités réduisent le prix du concentré payé au mineur et incitent ce dernier à mettre en place des procédés de concentration limitant la présence de certaines substances. La transformation du

[19]Par exemple, le contenu maximal acceptable pour le fer est de 3%. Pour le concentré contenant 5% de fer (2% au-dessus de la valeur acceptable) la pénalité est de 1,5 $/par pourcent de dépassement, la pénalité totale sera donc égale à 3$/tonne.

concentré contenant ces substances non-souhaitées est possible, mais coûteuse Boyanov *et al.* (2011).

Tableau 1.4: Eléments valorisés dans le concentré

Zn (%)	52
Ag (g)	"+" si > 0
Au (g)	"+" si > 0
Cd (%)	"+" si > 0
In (g)	"0"
Cu (%)	"0"
Fe (%)	"-" si > 2
As (%)	"-" si > 0
SiO2 (%)	"-" si > 2

Source : Euromin

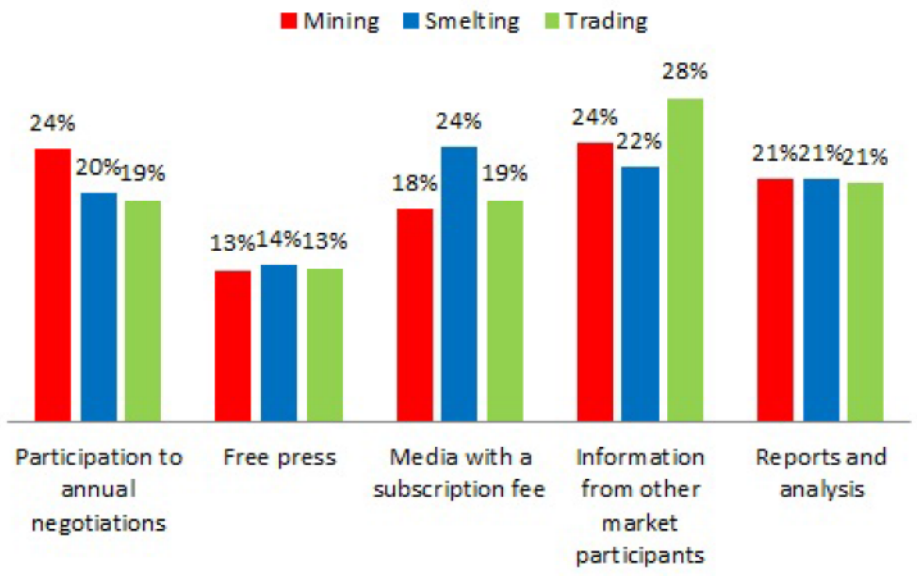
Le tableau 1.4 reprend les éléments du contrat de vente du concentré ainsi que les proportions autorisées de certains éléments. Ces proportions ne font pas l'objet de négociations régulières et correspondent au consensus de la filière sur le concentré type. Ce tableau présente les éléments chimiques valorisés dans le contrat du concentré. Un signe positif indique que le transformateur va payer au mineur le contenu observé. *A contrario*, un signe négatif indique que le mineur paiera au transformateur le contenu observé. Les chiffres indiquent le seuil de déclenchement de la pénalité. Par exemple, la présence en argent (Ag) dans le concentré sera tolérée et donne lieu à un paiement du transformateur au mineur, tandis que la présence d'arsenic (As) n'est pas tolérée.

Nous avons détaillé ci-dessus les clauses standard et spécifiques du contrat du concentré. La TC y tient une place à part du fait de l'information qu'elle révèle sur l'équilibre au sein de la filière. Le niveau de la TC a un impact sur le profit des firmes, de plus, même les firmes qui ne participent pas directement aux négociations de la TC se renseignent auprès d'autres acteurs de la filière sur son niveau (graphique 1.8). La TC est, par conséquent, une variable dont le rôle économique est mal appréhendé. Il nous faut donc proposer une stratégie d'étude afin d'identifier plus clairement son rôle dans l'équilibre de la filière.

II.2 Quelle modélisation pour la TC ? Hypothèses de travail et schéma de la filière

Nous sommes en présence d'une situation assez spécifique où les firmes procèdent à des transactions sur un bien dont le prix est défini par des variables exogènes (prix des métaux) et

Graphique 1.8: Sources d'information sur la TC



Source : Auteur

une variable endogène négociée (TC). De quelle manière cet arrangement contractuel permet aux firmes d'organiser la production et de coordonner les flux de matières ? Pour répondre à cette question nous proposons trois hypothèses quant au rôle et donc à la nature de la TC.

Plusieurs hypothèses peuvent être émises quant à la représentation de la filière de la production du métal à partir du concentré. Le détail de la filière présenté dans la partie précédente peut se résumer par des schémas reprenant les flux de matières et les prix qui leur sont associés. Pour présenter notre démarche, nous partons de la représentation la plus simple de type "boîte noire" (graphique 1.9). A ce schéma correspond la perception la plus simple de la filière, c'est-à-dire une seule entité travailland le zinc de la mine au marché du métal qui tient lieu ici de produit fini.

Notre méthodologie consiste alors à considérer les différentes possibilités de complexification de ce schéma, ainsi que les hypothèses associées à ces représentations plus élaborées. Il ressort de notre revue de la filière et de la définition de la TC que cette dernière n'est pas nécessairement perçue et utilisée de la même façon par l'ensemble des acteurs. Il nous semble donc plus pertinent de poser une hypothèse principale représentant une vision de la TC et de déterminer si la TC peut être a) modélisée conformément à cette hypothèse et b) se comporte empiriquement d'une façon qui valide cette modélisation. Nous proposons ainsi trois hypothèses de travail.

Graphique 1.9: "La boîte noire" de la filière



Source : Auteur

Hypothèse 1. *La TC est un instrument de la négociation permettant la coordination et l'équilibre technique de la filière.*

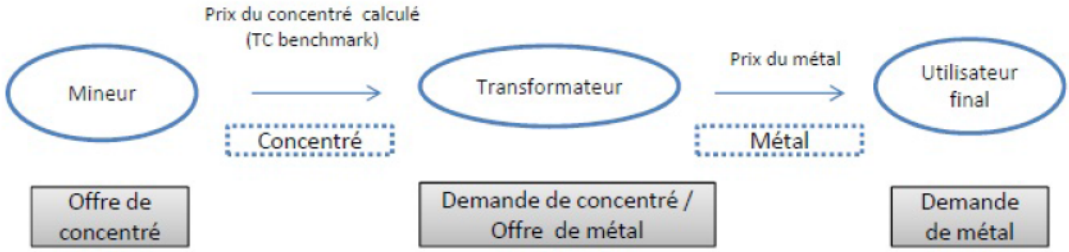
L'Hypothèse 1 postule que la TC est un instrument permettant aux mineurs et aux transformateurs de s'accorder sur les volumes produits de façon à sécuriser les approvisionnements et les débouchés des uns et des autres. (graphique 1.10). Ce scénario correspondrait à l'utilisation du prix du concentré calculé et à la vision d'une TC *benchmark*. Le prix du concentré utilisé dans les transactions est calculé comme la somme des valorisation des métaux composant le concentré après déduction de la TC. On peut ainsi, en déterminant *ex-ante* la valeur de la TC, obtenir le "prix" du concentré qui correspond aux quantités que chacun désire produire. L'équilibre quantitatif de la filière est assurée à l'aide de la TC négociée, qui permet d'ajuster le prix aux quantités. Ces quantités sont déterminées sans référence à un optimum de marché, elles reflètent simplement les contraintes de production des mineurs et des transformateurs. Du fait de la négociation ex-ante de la TC, l'information sur les plans de production et la demande n'est pas complètement révélée par un processus de marché classique, ce qui revient à accorder une importance significative aux rapport des forces entre les firmes de la filière. Cette TC comme instrument de la coordination a donc une valeur qui reflète l'équilibre technique[20] et le pouvoir de marché des acteurs de la filière.

Hypothèse 2. *La TC remplit le rôle d'une variable de prix classique sur le marché du concentré.*

L'hypothèse 2 postule que les échanges de concentré se font sur la base d'une information publique et entièrement révélée, capturée par la TC. On suppose que l'ensemble des acteurs

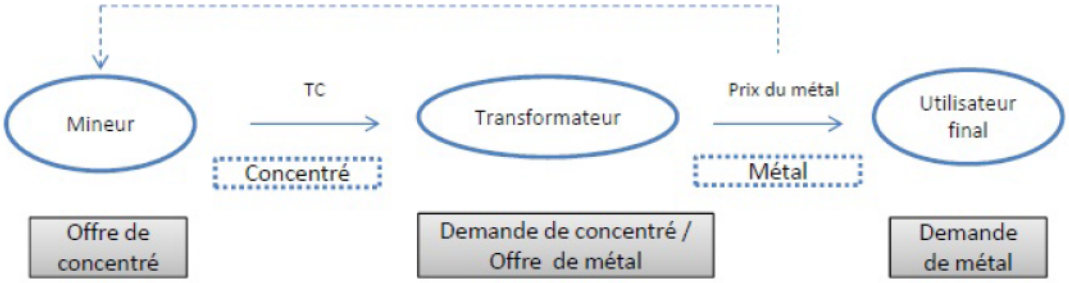
[20]Sous équilibre technique nous entendons une situation pérenne où les choix des mineurs et des transformateurs en matière de production sont compatibles entre eux en termes de quantités et de distribution du profit.

Graphique 1.10: Représentation de l'Hypothèse 1



Source : Auteur

Graphique 1.11: Représentation de l'Hypothèse 2



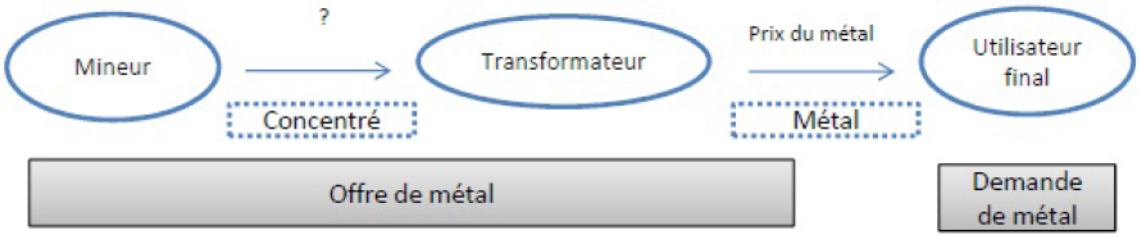
Source : Auteur

considère le niveau de TC comme donné et n'ont pas assez de poids pour influencer directement son niveau lors des négociations annuelles. De fait, la TC se comporte comme un prix, fixé sur un marché réel une fois par an. Les échanges de concentré sont alors fonction de l'offre et de la demande et ne sont influencés que par la demande finale en métal, elle aussi publique, et pèse sur les anticipations de tous (graphique 1.11). Le principal enjeu de cette hypothèse est de faire la lumière sur le rôle des transformateurs, qui doivent gérer l'interdépendance entre les deux marchés, ceci afin d'atteindre un équilibre général. Ce dernier peut soit dépendre de la résolution partielle sur le marché du concentré, soit de la résolution partielle sur le marché du métal.

Hypothèse 3. *La TC est un prix de transfert dans le cadre d'une filière verticalement intégrée.*

La troisième hypothèse correspond à l'intégration verticale des sociétés minières et de transformation (graphique 1.12). Dans ce cas, les opérations d'extraction et de transformation sont réalisées par une entité intégrée et aboutissent à la fourniture du métal sur le marché du métal. La transformation est gérée en interne, elle est valorisée à l'aide d'une variable de transfert

Graphique 1.12: Représentation de l'Hypothèse 3



Source : Auteur

entre les unités de la firme verticalement intégrée. Cette hypothèse ne reflète pas correctement la marge de manœuvre réelle dont disposent les transformateurs dans la configuration actuelle. Elle pourrait s'avérer intéressante si notre analyse de l'hypothèse 1 valide la présence d'un véritable oligopole avec entente (implicite) des mineurs et des transformateurs. Nous disposons pourtant de suffisamment d'éléments pour écarter cette possibilité à ce stade, raison pour laquelle nous ne testerons pas l'hypothèse 3.

Les hypothèses faites quant à la structure de la filière permettent de constater que la TC peut être vue de différentes manières en fonction des hypothèses de travail retenues. D'une part, on peut considérer la TC comme un outil structurant la filière, négocié dans l'objectif de coordonner les activités des firmes et de limiter les risques liés à la gestion des flux physiques qui y sont associés. D'autre part, la TC pourrait être considérée en tant que variable de prix à part entière traduisant l'équilibre entre l'offre et la demande du concerté. Ce raisonnement peut être développé par la prise en compte des activités d'extraction et de transformation en tant qu'activités indépendantes sur un marché donné afin de les modéliser dans le cadre de l'équilibre partiel.

III L'hypothèse 1 : la TC en tant qu'instrument de coordination de la filière

Dans cette section nous testons l'hypothèse selon laquelle la TC est un instrument négocié de l'équilibre technique. Cette hypothèse se base d'une part sur l'analyse des interactions stratégiques (au sens de l'économie industrielle, voir Tirole (1993)) au sein de la filière et d'autre part sur la nécessité de gérer les contraintes d'approvisionnement des mineurs et des transformateurs. Nous proposons donc une analyse de la structure de la filière et une formulation du

problème de coordination sur la base d'un mécanisme de partage du profit. Nous concluons que l'équilibre technique de la filière suppose une évolution coordonnée des quantités et de la TC indexée sur le prix du métal. Pour cela, nous testons empiriquement les liens entre la TC, le prix du métal et le stock du concentré afin de déterminer la nature de la relation statistique entre ces variables.

III.1 L'interdépendance des firmes de la filière : approvisionnements et interactions stratégiques

III.1.1 Coordination par la TC : stocks et contraintes de flux

Comme nous l'avons souligné lors de notre présentation de la filière et du contrat de concentré, le premier rôle théorique de la TC est de garantir la coordination respectant l'équilibre technique de la filière. Cette coordination de la filière du zinc consiste en l'harmonisation des flux de concentré et de métal entre le mineur, le transformateur et le consommateur final pour garantir la continuité du processus de production. Cette continuité se traduit par l'absence de ruptures d'approvisionnement pour le transformateur et par la non-saturation des capacités de stockage du mineur. Dans cette section nous cherchons à identifier les variables qui participent à la coordination des flux physiques de la filière ainsi que le lien qui existe entre la TC et ces variables.

Les ajustements réalisés au sein de la filière dépendent de l'évolution de la demande finale. Les mineurs sont les premiers à modifier leur production sous l'impulsion du prix du métal. Puis, dans un second temps, les transformateurs modifient leur demande du concentré. Ces étapes d'ajustement sont représentées sur le graphique 1.13. Naturellement, ces ajustements s'accompagnent de changements des prix : à la fois le prix du métal et celui du concentré, par le biais du prix du métal et de la TC. On peut ainsi identifier un lien entre la TC, le prix du métal et la quantité du concentré (produite et consommée).

Les stocks peuvent être détenus par les mineurs et non les transformateurs[21]. La détention du stock par le mineur répond à une logique de production. Ainsi, lorsque l'offre dépasse la demande du concentré, le mineur peut stocker une certaine quantité de concentré en attendant une amélioration des conditions de vente. Le transformateur détient un stock plutôt dans une logique

[21]Selon (Marquet, 1992) le stock permettant de garantir la sécurité des approvisionnements est considéré comme purement technique, par opposition au stock spéculatif ou encore au stock de report, servant à pallier à d'éventuelles défaillances de production ou d'importation (le stock de report est utilisé pour les matières premières agricoles afin d'évaluer la sécurité alimentaire d'un Etat.).

Graphique 1.13: Les étapes d'ajustement au sein de la filière



Source : Auteur (sur la base des entretiens avec les industriels)

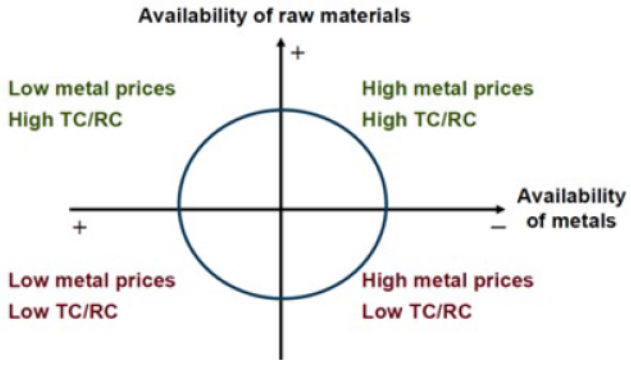
de régulation des flux afin d'éviter les ruptures d'approvisionnement en concentré et d'assurer un fonctionnement en continu de ses lignes de production. Ainsi, il évite de détenir le stock du métal en concluant des contrats de vente annuels basés sur ses prévisions de consommation. En situation de pénurie sur le marché, le mouvement de déstockage assure alors au transformateur la possibilité de produire les quantités prévues.

Les firmes associent un niveau de la TC et un prix du métal aux équilibres quantitatifs du concentré et du métal. Le schéma 1.14 issu du rapport de la société Boliden présente une interprétation des liens entre ces variables. Par exemple, un niveau bas de la TC et du prix du métal sont associés à un surplus du concentré et du métal. Les transformateurs sont donc incités à réduire leurs capacités de transformations (revenu faible de la TC), les mineurs réduisent également leur production compte tenu d'un faible prix du métal. Selon ce schéma, tout équilibre pour la filière est inatteignable, puisque chaque ajustement mène à un nouveau déséquilibre quantitatif.

Les industriels interrogés dans le cadre de notre questionnaire[22] mentionnent les ajustements quantitatifs comme leur première réaction en réponse à une variation de la TC (graphique 1.15). Cette réaction quantitative (augmentation ou réduction des volumes produits) est proposée par 54% des firmes. Par ailleurs, les firmes citent comme facteurs explicatifs principaux à la variation de la TC le rapport entre l'offre et la demande ainsi que le stock détenu. Ces facteurs

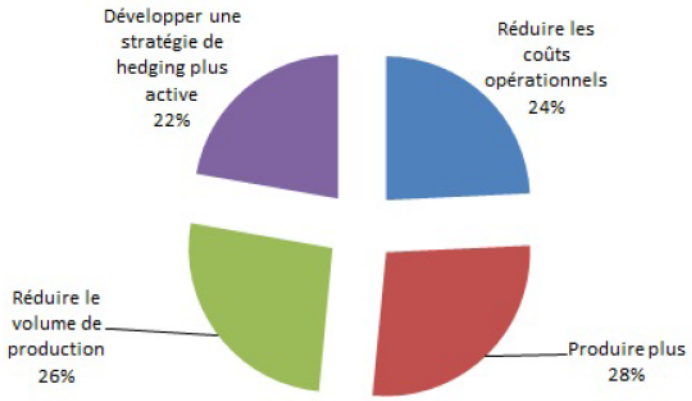
[22]Les objectifs du questionnaire ensemble avec les principaux points méthodologiques liés à l'échantillonnage, la collecte des données ainsi que l'analyse des résultats sont détaillés dans le chapitre 3.

Graphique 1.14: Cycle d'ajustement du métal et du concentré



Source : Boliden

Graphique 1.15: Réponse aux variations de la TC



Source : Auteur

sont mentionnés devant le prix du métal (qui arrive en troisième position) et devant le coût de transformation (graphique 1.16).

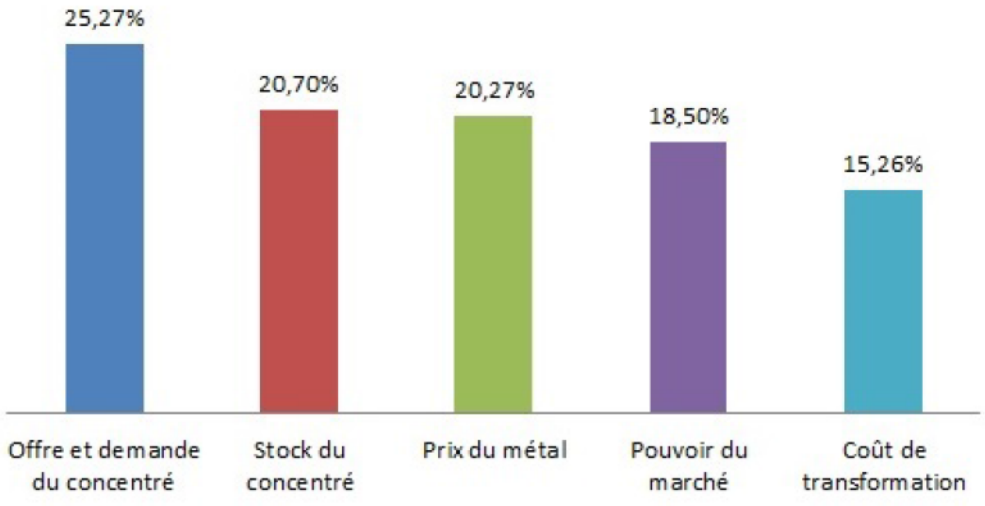
Ainsi, l'ensemble de ces éléments nous conduit à assigner un rôle majeur à la variable de stock dans les ajustements des firmes de la filière. La coordination de la filière est associée à ces ajustements quantitatifs, ce qui nous pousse à explorer l'évolution historique de la TC et du stock. Le graphique 1.17 reprend les écarts historiques entre l'offre et la demande ainsi que la TC de base. L'écart entre l'offre et la demande de concentré correspond à des périodes nécessitant un ajustement quantitatif entrepris par les mineurs et les transformateurs. Ce besoin d'ajustement permet donc à une partie des firmes de la filière de renégocier un niveau plus avantageux de la TC .

A partir de 1992 l'offre de concentré est régulièrement inférieure à la demande. Les transformateurs ont puisé dans les stocks puisque les capacités productives étaient alors contraintes ; ils ont également accepté une TC plus faible dans le but de sécuriser leurs achats de concentré. En raison du prix bas du zinc dans les années 1990, la rentabilité de nouveaux projets miniers ne suffisait pas pour augmenter davantage la production minière, en conséquence de quoi l'effort d'ajustement a été supporté par les transformateurs. En 2004 la hausse du prix du métal a entraîné la résorption du déficit ; la filière s'est rapprochée de l'équilibre en 2008 (11,6 Mt de production minière et 11,7 Mt de consommation du concentré).

Lorsque le prix du métal est élevé, de nouvelles mines sont mises en exploitation entrainant une hausse de l'offre de concentré. Cet ajustement n'est pourtant pas immédiat en raison du temps de mise en production. Inversement, à partir du moment où le prix du métal est bas, les mines peu ou pas rentables procèdent à des fermetures temporaires réduisant ainsi l'offre de concentré. Ainsi, une augmentation du prix du métal représenterait un ajustement du marché pour faire face à une pénurie de métal et pour relancer des projets jusqu'ici peu rentables.

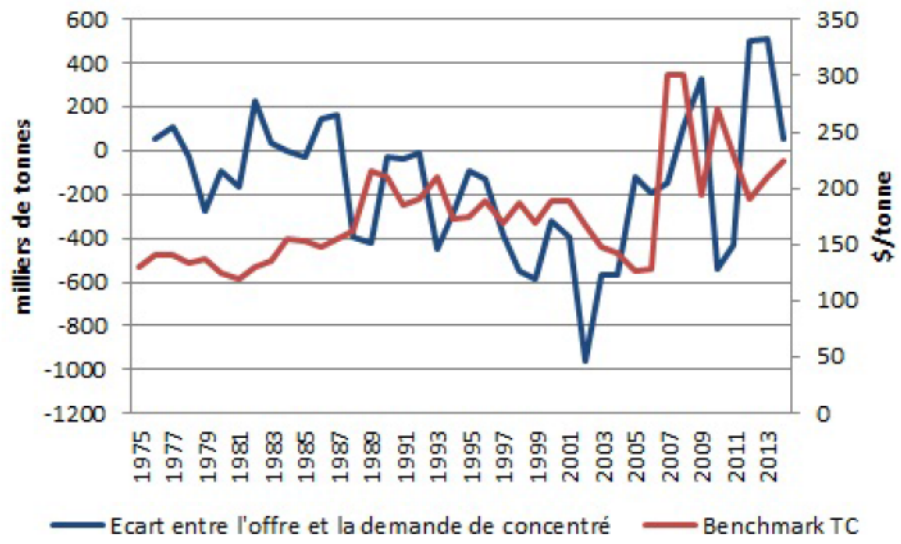
Ce schéma semble pourtant évoluer ces dernières années et les transformateurs commencent à mettre en place des stratégies d'ajustement qui n'avaient pas lieu auparavant. En 2013, les mineurs (notamment les mineurs chinois) souhaitaient une TC plus faible et ils ont donc tardé à ajuster leurs capacités, créant un déficit « artificiel» du concentré. Cependant, les transformateurs ont pris les devants en ajustant leurs capacités, de sorte à ne pas donner plus de poids aux mineurs lors des transformations. Cette situation est complètement nouvelle sur le marché

Graphique 1.16: Facteurs explicatifs de la TC



Source : Auteur

Graphique 1.17: Ecart entre offre et demande et la TC de base



Source : Euromin

et marque un changement de comportement des firmes de la filière, témoignant de davantage de concurrence plutôt que de coopération entre les firmes minières et transformatrices.

Pour autant, le besoin d'ajustement en cas de déséquilibre est étroitement lié à la problématique des flux physiques que nous avons évoquée lors de la présentation des acteurs de la filière. En effet, ni le producteur de concentré ni le transformateur ne peuvent travailler à un rythme de production soutenu sans écouler leur production. L'existence de stocks trop importants peut même entrainer l'arrêt de la production associé aux coûts supplémentaires relatifs au stockage (Marquet, 2000). Le stockage ne faisant pas partie des activités principales des entreprises considérées, le problème des débouchés des produits se pose très rapidement.

Si en cas de force majeure,les infrastructures de stockage qui existent sur les sites de production servent à maintenir le niveau de la production existante, en aucun cas elles ne peuvent pas être utilisées comme sources d'approvisionnement pérennes. Cependant, le stockage du concentré à la mine peut avoir lieu, en particulier si la localisation de la mine ne permet pas d'avoir un service de transport annuel (la mine de *Red Dog* stocke le concentré d'octobre à juin compte tenu de la fermeture de la saison maritime).

La question de la gestion des stocks et des flux constitue donc la première mission de la TC en lien avec le prix du métal. Une TC trop basse met à mal la capacité des mineurs à écouler leur production, quand une TC trop élevée fait courir un risque de pénurie de concentré aux transformateurs. Les négociations de la TC visent alors à éviter ces deux écueils. Nous allons

maintenant déterminer dans quelle mesure ces interactions, nées de la gestion des flux, peuvent favoriser des comportement stratégiques entre mineurs et transformateurs.

III.1.2 Interactions stratégiques et structure de la filière : l'équilibre des profits

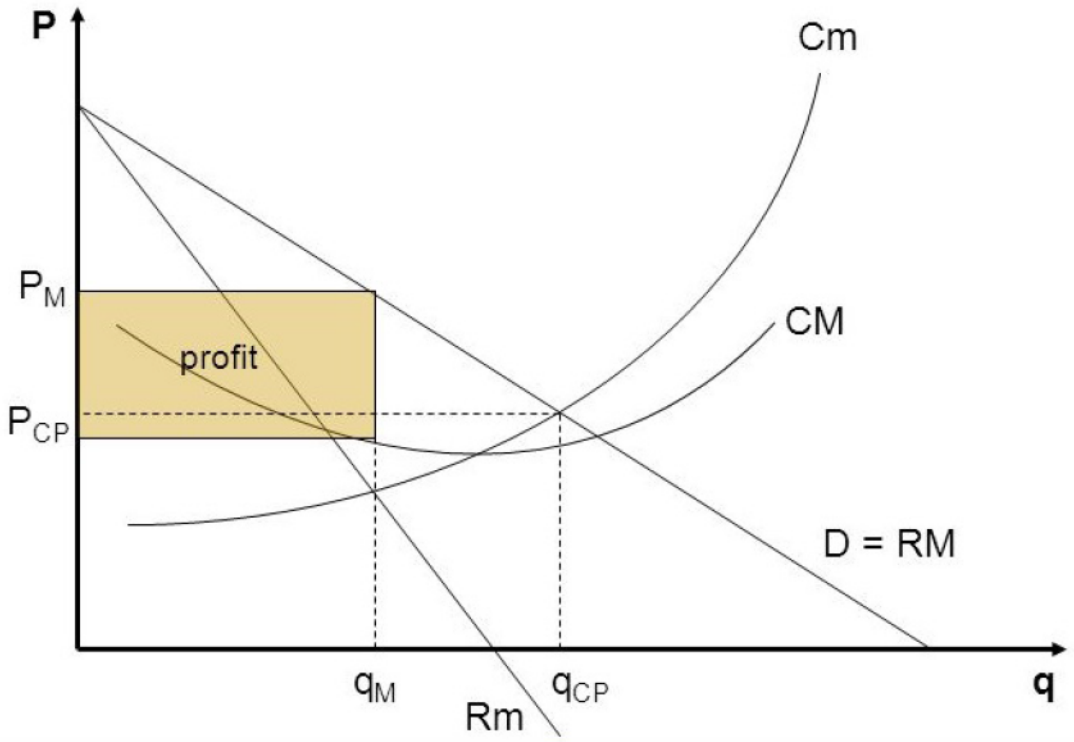
Quelle structure pour la filière ?

La détermination de la structure de l'industrie est le point de départ de notre analyse. Traditionnellement, on identifie la concurrence pure et parfaite (CPP) et le monopole aux deux cas polaires de l'organisation d'un marché (Graphique 1.18). En concurrence pure et parfaite les firmes sont preneuses de prix, elles ne peuvent pas influencer le marché et choisissent la quantité produite en fonction de leur structure des coûts en égalisant le prix au coût marginal. Au contraire, en situation de monopole, une seule firme représente l'offre et choisit le prix et les quantités afin d'égaliser le coût marginal et la recette moyenne. La CPP est considérée comme une situation Pareto-optimal, car les firmes baissent leurs coûts de production jusqu'au minimum afin de se maintenir sur le marché. A l'opposé, le monopole représente une situation critiqué pour son inefficience : la perte sèche c'est-à-dire la perte en termes d'efficience économique, est la plus importante par rapport à d'autres structures de marchés. Par ailleurs, les types intermédiaires d'organisation du marché (concurrence monopolistique, oligopole) sont définis en fonction du nombre d'offreurs et de demandeurs.

La structure oligopolistique est le plus souvent modélisée à l'aide de cas de duopole, situation ou seules deux firmes sont en compétition sur le marché. Les firmes vont alors choisir entre une stratégie de l'entente ou des stratégies concurrentielles. Les stratégies d'entente correspondent au modèle d'équilibre coopératif où les firmes s'entendent sur les prix et les quantités afin de partager les parts du marché et d'éviter de nouveaux entrants sur le marché (ex. cartel). Les stratégies concurrentielles couvrent une grande variété des modèles d'équilibre non coopératifs amplement abordées dans la littérature économique.

Le modèle de duopole de Bertrand (1883) explore le cas où les firmes se font concurrence par les prix : chaque firme sert la totalité de la demande qui s'adresse à elle. Le modèle fonctionne sous les hypothèses d'homogénéité du produit, de coût de production identique pour les deux firmes et de la possibilité de produire pour satisfaire la totalité de la demande. La concurrence par les prix menée jusqu'au bout, entraîne l'établissement du prix au même niveau qu'en CPP. Donc à force de rivaliser, les firmes descendent au niveau de profit nul et aboutissent à un prix optimal du marché. Ce modèle ne tient pourtant pas compte des différences entre les firmes, ni de la différenciation des produits, ou bien encore des contraintes de production que les firmes

Graphique 1.18: Monopole versus Concurrence Pure et Parfaite



Source : Pindyck et al. (2005)

peuvent rencontrer.

Par conséquent, les stratégies relatives aux quantités sont multiples. Parmi les principales, on peux citer les duopoles de Cournot et de Stackelberg (duopole asymétrique) et le duopole de Bowley (double maitrisé) (Cournot, 1838), (Stackelberg, 1934), (Bowley, 1928). Les deux firmes sont interdépendantes (interdépendance conjoncturelle) et chaque firme maximise son profit compte tenu des quantités produites par le concurrent. Cournot (1838) considère des firmes de taille similaire alors que Stackelberg (1934) introduit dans son raisonnement des firmes de taille inégales dont l'une est considérée comme « leader » compte tenu de son poids sur le marché. Le leader choisit alors sa quantité en intégrant l'offre du suiveur (interdépendance conjecturale).

Bowley (1928) étudie l'équilibre instable où les deux firmes se considèrent comme dominantes et ne peuvent pas rester dans cette situation sur plusieurs périodes : in fine cette situation va évoluer vers un équilibre plus stable. Les stratégies d'entente par les quantités permettent de faire d'abord le choix des quantités et ensuite de se livrer une concurrence par les prix en fonction de cette quantité. Les firmes ont peu d'intérêt à diminuer le prix car elles fonctionnement à capacités maximales. Toute augmentation du prix signifierait donc que les firmes vendent moins qu'elles ne le souhaitent, cette situation est également à éviter (Tirole, 1993).

L'organisation des transactions entre mineurs et transformateurs exclue les cas de la CPP et du monopole. En effet, les firmes en amont de la filière sont considérées comme "offreurs" (mineurs) tandis que les firmes en aval de la filière sont définies comme "demandeurs" (transformateurs). Le bien produit et vendu par les mineurs correspond à la consommation intermédiaire du transformateur. Il existe un certain nombre d'offreurs et de demandeurs, mais leur nombre est limité : ils ne sont pas atomistiques au sens de la CPP. Ainsi, la filière du zinc autour de la production du concentré est caractérisé par :

- Un nombre limité d'offreurs et de demandeurs ;
- Un produit relativement standardisé, au moins pour le gros des volumes échangés ;
- Des barrières à l'entrée importantes du fait des coûts fixes de production ;
- Des contraintes de localisations (ressources) ;
- Des coûts de transactions élevés (infrastructures lourdes et distances).

Nous considérons qu'il n'existe pas de firme leader parmi les mineurs et les transformateurs. Cependant, quelques firmes minières et transformatrices détiennent des parts de marché plus

importantes que d'autres (voir la section I.2). Naturellement, on pourrait supposer que ces firmes vont utiliser leur pouvoir du marché pour obtenir des profits supérieurs à ceux de leurs concurrents. En accord avec les travaux de Slade (2004) sur l'absence de liens entre la profitabilité et la concentration de l'industrie minière, nous considérons qu'il n'existe pas de stratégies de "leader-suiveurs" au sein des firmes minières et transformatrices : les firmes de l'industrie se comportent comme si elles étaient de taille comparable.

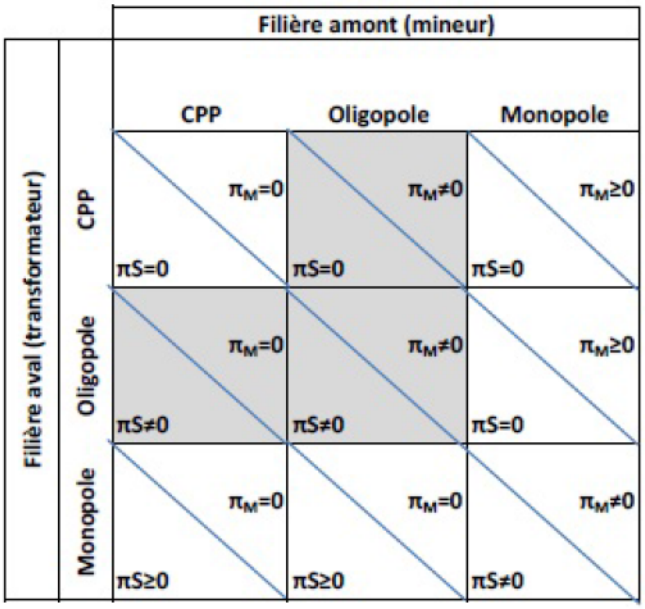
Les mineurs et les transformateurs fonctionnent dans un environnement caractérisé par la spécificité des actifs, l'incertitude et la fréquence des transactions dans le sens de Williamson (1985, 1999). Nous pouvons ainsi considérer la filière en tant qu'organisation ayant un objectif commun et des objectifs individuels différents, l'ensemble étant réuni par des mécanismes de coordination dans le sens de Simon (1979), Coase (1937) et Barnard (1938). Cette description correspond au cas théorique de l'oligopole bilatéral : les mineurs et les transformateurs vont donc choisir entre concurrence et coopération.

La structure de l'oligopole bilatéral et ses implications sur le choix des firmes le composant sont assez bien documentées dans la littérature économique. En effet, les travaux de McAfee et Schwartz (1994), Fontenay et Gans explorent l'intérêt de passer de l'oligopole bilatéral à l'intégration verticale en raison du positionnement des firmes au sein de la filière. Inderst et Wey (2001) détaillent les conséquences de la négociation des prix sur le choix de la structure du marché. Nous nous intéressons surtout à la coopération au sein de l'oligopole bilatéral considérant l'absence de l'intégration verticale généralisée de la filière. Ce choix est notamment inspiré par les travaux de Bolton et Whinston (1993) sur la détermination d'une structure de l'industrie optimale compte tenu des contraintes d'approvisionnement.

Obtention et partage du profit

La coordination au sein de l'oligopole passe par l'établissement d'un niveau de TC qui permet aux firmes de fonctionner à capacité maximale tout en évitant l'entrée de nouvelles firmes sur le marché. Le nombre de firmes doit être maintenu, ainsi que la distribution des firmes au sein de l'industrie afin de garantir le profit global et les profits individuels. La matrice 1.19 récapitule les profits théoriques des mineurs (π_M) et des transformateurs (π_S) en fonction de la structure de l'industrie.

Graphique 1.19: Matrice des profits du mineur et du transformateur en fonction de la structure de la filière



Source : Auteur

Les cas les plus intéressant sont ceux indiqués en gris sur le graphique 1.19 et correspondant à l'oligopole non intégré verticalement. Lorsque un seul type de firmes est structuré en oligopole alors que l'autre type de firmes est atomistique, les firmes de l'oligopole vont mettre en place des stratégies visant à capter la totalité du profit disponible. Dans le cas où l'industrie se rapproche de l'oligopole bilatéral, le profit sera partagé entre les firmes offreuses et demandeuses de la filière. Ce cas de figure correspond à l'organisation de la filière de zinc et pourrait être modélisé à l'aide du modèle d'oligopole bilatéral de Stackelberg. Plutôt que de procéder à la maximisation des profits individuels (stratégie sous-optimale), les firmes intègrent l'objectif de coordination des activités dans leurs stratégies par le biais de la maximisation du profit total de la filière (stratégie optimale).

A partir du moment où la condition de maximisation du profit est respectée, les mineurs et les transformateurs procèdent au partage du profit via le prix du bien intermédiaire. Ce bien intermédiaire est défini comme un bien appelé à être transformé pour l'obtention d'un bien final. Le concentré est alors considéré comme un bien intermédiaire nécessaire pour la production du métal et son "prix" sera déterminé par la TC.

La distribution du profit passe par l'établissement des fourchettes de fluctuation pour le prix de vente du bien intermédiaire entre le mineur et le transformateur. La négociation de ce prix de vente correspondrait donc à la négociation d'une variable représentant l'équilibre technique de l'industrie. De cette manière et sous réserve d'une circulation parfaite de l'information au sein de l'oligopole, la structure du marché permet la mise en place d'un système d'allocation des ressources avec un niveau de production optimal dans le sens de Pareto.

Le concentré Q_c est alors vendu au prix du concentré P_c. A l'équilibre la production du métal Q_m est une fonction croissante du concentré :

$$Q_c = \alpha(Q_m) \tag{1.6}$$

α étant une fonction croissante. La demande de métal est une fonction décroissante du prix du métal :

$$P_m = P(Q_m), \quad dP_m/dQ_m < 0 \tag{1.7}$$

Le profit du mineur π_M est le résultat de la différence entre le revenu de vente du concentré et les coûts d'extraction de ce concentré. Le profit du transformateur π_S est formulé comme la différence entre le revenu de la vente du métal, les dépenses d'achat du concentré et le coût de transformation. Compte tenu de l'interdépendance des mineurs et des transformateurs, on cherche à maximiser le profit total π_T de l'industrie qui correspond à la somme des profits respectifs du mineur et du transformateur. Le coût total du transformateur Cs, fonction de la quantité du métal produit Q_m, se décompose en coût d'achat du bien intermédiaire $(P_c * Q_c)$ et celui des autres facteurs $K(Q_m)$ représentant les inputs non substituables dont le prix est constant et exogène :

$$Cs = Cs(Q_m) = P_c * Q_c + K(Q_m) \tag{1.8}$$

Le coût total pour le mineur, de façon similaire, dépend de la quantité du concentré produit Qc :

$$Cm = Cm(Q_c) \tag{1.9}$$

La définition des profits est donc :

$$\pi_M(Q_c) = P_c * Q_c - Cm(Q_c) = Pc(\alpha(Q_m)) - Cm(\alpha(Q_m)) \tag{1.10}$$

$$\pi_S(Q_m) = Q_m * P(Q_m) - P_c(\alpha(Q_m)) - K(Q_m) \tag{1.11}$$

$$\pi_T(Qm) = \pi_M(Q_m) + \pi_S(Q_m) = Q_m * P(Q_m) - K(Q_m) - C_m(\alpha(Qm)) \tag{1.12}$$

Le profit total $\pi_T(Qm)$ ne dépend pas du prix du concentré. Il dépend en revanche du prix du métal et des coûts de production du mineur et du transformateur. C'est donc la négociation du prix du concentré qui permettra la répartition du profit entre les firmes.

La maximisation du profit total permet d'obtenir la quantité du métal d'équilibre Qm^* utilisée pour déterminer le niveau de production du mineur et du transformateur :

$$\text{Max}\,\pi_T : \quad \frac{\partial \pi_T}{\partial Q_m} = 0$$

Les profits individuels du mineur et du transformateur dépendront du prix du concentré et des quantités produites :

$$P(Q_m) + Q_m * \frac{dP_m}{dQ_m} = \frac{dK}{dQ_m} + \frac{dC_m}{d\alpha(Q_m)} * \frac{\partial \alpha(Q_m)}{dQ_m} \tag{1.13}$$

$$Q_m^* = f(P_m, C_m, K, \alpha) \tag{1.14}$$

Ainsi, les valeurs que peut prendre le prix du concentré P_c sont obtenues suite à la maximisation du profit individuel du mineur et du transformateur, ceci en fonction de la quantité du métal d'équilibre. On estime alors le profit individuel à l'aide de la valeur Q_m* sous la double contrainte de profit positif pour chacune des firmes ($\pi_M(P_c) > 0$ et $\pi_S(P_c) > 0$) :

$$\pi_M(P_c) = Pc * \alpha(Q_m^*) - C(\alpha(Q_m^*)) \tag{1.15}$$

$$\pi_S(P_c) = Q_m * (P(Q_m^*)) - P_c(\alpha(Q_m^*)) - K(Q_m^*) \tag{1.16}$$

$$\tag{1.17}$$

sous les conditions jointes :

$$\pi_M(P_c) > 0 \tag{1.18}$$

$$\pi_S(P_c) > 0 \tag{1.19}$$

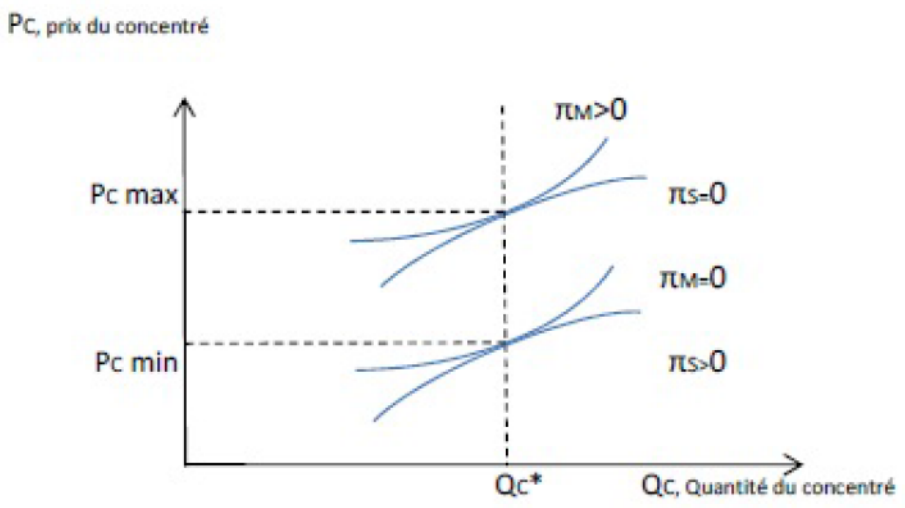
$$P_{c,min} = \frac{C(\alpha(Q_m^*))}{\alpha(Q_m^*)} \tag{1.20}$$

$$P_{c,max} = \frac{Q_m^*(P(Q_m^*)) - K(Q_m^*)}{\alpha(Q_m^*)} \tag{1.21}$$

$$P_c \in [P_{c,min}; P_{c,max}] \tag{1.22}$$

L'expression 1.18 exprime le seuil minimum du prix du concentré nécessaire pour que le mineur ne produise pas à perte. L'inégalité 1.19 exprime elle la valeur maximale du prix du

Graphique 1.20: Schéma du partage du profit



Source : Auteur

concentré que le transformateur est disposé à payer pour obtenir un profit non nul. Ainsi, la maximisation du profit du mineur permet de déterminer la limite basse des fluctuations du prix du concentré. Inversement, la maximisation du profit du transformateur indique la limite haute des fluctuations du prix du concentré.

La TC garante de la pérennité de l'entente

Le mineur et le transformateur vont donc coordonner les volumes de production du métal et du concentré en utilisant le prix du concentré comme variable de partage du profit (graphique 1.20). Le prix fixé prendra une valeur entre $P_{c,max}$ lorsque le transformateur ne fera pas de profit (le profit est alors maximal pour le mineur) et $P_{c,min}$ où le profit du mineur sera nul (tandis que le profit du transformateur sera maximal).

Le prix du concentré étant une variable calculée, c'est donc la TC qui participe à la coordination au sein de la filière. Ceci est parfaitement cohérent avec le caractère négocié de la TC et consacre son rôle d'instrument de coordination basé sur un consensus. Le prix du métal ne rentre pas en considération ici, car le profit du transformateur est déterminé par son accord avec le mineur, indépendamment de la demande finale.

La coordination des mineurs et des transformateurs se traduit également par un partage du profit assurant à chaque type de firme un profit non nul. Du point de vue des firmes, cette solution est préférable à une solution de concurrence pour deux raisons. Tout d'abord, les firmes

sont assurées d'obtenir un profit non nul, ce qu'elles ne sont pas certaines d'obtenir en situation de concurrence. Ensuite, la réduction de l'incertitude liée aux seuils de fluctuation de la TC (maximum et minimum) permet de gérer les contraintes de production et d'approvisionnement évoquées au début de ce chapitre. Les firmes peuvent alors gérer la contrainte des flux physiques par l'utilisation des contrats de long terme dans lesquels la valeur de la TC est définie.

Une autre dimension fondamentale de ce résultat est le contrôle du pouvoir de marché. La TC ne fournit pas seulement un instrument pour se protéger du risque d'approvisionnement, elle permet également de s'assurer qu'aucune firme ne disposera d'un pouvoir de marché excessif. La renégociation annuelle de la TC est l'occasion pour les mineurs et les transformateurs de fixer un niveau pour la TC compris entre $P_{c,min}$ et $P_{c,max}$, soit un niveau qui pérennise l'oligopole bilatéral et rend l'entente indispensable.

La fluctuation de la TC entre les limites maximum et minimum témoigne d'une répartition du profit négociée. Plus le niveau de la TC s'approche d'une valeur médiane entre ces limites, plus la répartition du profit sera équilibrée. Nous découvrons ici une organisation de la filière stable et soutenable où la TC est un outil du maintient de la structure de la filière existante qui, en retour, justifie l'utilisation de la TC. La coordination de la filière de zinc est donc possible grâce à l'utilisation de la TC via le mécanisme de partage du profit. Inversement, l'utilisation de la TC tient à la structure de la filière et aux contraintes qui la définissent. Tant que la TC dans son rôle actuel existe, elle témoigne du caractère immuable de la structure de la filière.

Pensée comme un élément d'entente, la TC est également un indicateur du pouvoir de marché de la filière. Si la TC venait à disparaitre, ça serait la preuve que le pouvoir de certains acteurs est devenu suffisamment fort pour mettre le système à bas. En effet, la fluctuation de la TC entre les valeurs maximales et minimales témoigne d'un pouvoir du marché raisonnable de chaque type des firmes. Cependant, un pouvoir de marché plus important des mineurs ou des transformateurs se traduirait par un rapprochement de la TC de la limite haute ou basse, voir par la fixation d'une la TC en dehors des seuils de fluctuation, ce qui mettrait immédiatement fin à l'entente.

Finalement, ce mécanisme de partage de profit comprend un mécanisme compensatoire en raison de l'indexation de la TC sur le prix du métal. Il permet alors aux mineurs d'accorder une TC plus importante aux transformateurs lorsque les profits de l'industrie minière sont élevés. A l'inverse, lorsque les profits de l'industrie minière sont bas, ce sont les transformateurs qui accordent aux mineurs une TC plus faible. Dans les deux cas, ce sont les firmes "gagnantes" qui compensent aux firmes "perdantes" une partie des pertes. Cette compensation est nécessaire compte tenu de l'interdépendance des firmes de la filière et des contraintes des flux physiques qui sont à l'origine du besoin de coordination.

L'utilisation de la TC a donc un rôle incitatif pour la coopération des firmes au sein de la filière. L'absence d'un mécanisme de partage du profit entrainerait l'élimination d'un certain nombre de firmes, engendrant l'apparition du risque des flux physiques (risque de l'approvisionnement et de l'écoulement de la production). Les cinq contraintes associées à l'activité des firmes au sein de la filière se trouvent donc satisfaites uniquement dans le cadre décrit dans cette section. De cette manière la TC assure la coordination technique permettant la gestion quantitative des opération de la production du zinc.

Partant d'une simple clause technique du contrat de concentré, la TC se révèle être un instrument qui remplit trois fonctions. Elle sert tout d'abord à maintenir un équilibre technique au sein de la filière compatible avec les contraintes d'approvisionnement de chacun. Elle est employée à contrôler le pouvoir de marché des acteurs et de pérenniser ainsi une entente vitale à la réalisation de sa première fonction. Elle permet enfin, via l'indexation sur le prix du métal, de redistribuer mécaniquement les profits, renforçant l'entente par un mécanisme de règlement simple et efficace. Dans le cadre de l'hypothèse 1 il nous reste maintenant à vérifier si la TC a un comportement empirique cohérent avec ces conclusions.

III.2 La validation empirique de la TC en tant que variable de coordination (benchmark)

Nous avons établi que les liens entre la TC, le prix du métal et le niveau du stock traduit la coordination des flux physiques au sein de la filière. Face aux multiples interrogations des firmes sur la nature de la relation entre la TC et le prix du zinc d'un côté mais aussi entre la TC et le stock, une meilleure compréhension de l'évolution de ces variables s'avère nécessaire. D'un côté, les variables du stock et du prix du zinc sont utilisées (au moins de façon informelle) par les intervenants pour formuler des anticipations sur le niveau de la TC. De l'autre côté, les réalisations passées de la TC semblent impacter sensiblement son niveau actuel. Cette dernière relation est évoquée dans la littérature économique pour être ensuite confirmée par l'étude de la série de la TC de base.

Nous proposons dans cette partie d'analyser la contribution des chocs sur le prix du zinc et sur le stock du concentré à la variation de la TC tout en complétant cette étude par l'analyse des réponses de la TC à ses variables passées. L'existence d'une relation de long terme liant ces trois variables confirmerait leur évolution commune et donc, notre hypothèse.

III.2.1 Relation de cointégration entre la TC, le prix du métal et le stock

La théorie déport normal (Keynes (1930) et du stockage (Working, 1933, Kaldor, 1939, Brennan, 1958, Fama et French, 1988, Pindyck, 1994)) présente les liens entre le stock de matière et le niveau de prix présent et anticipé. Les études empiriques de Roache et Erbil (2010), Rotemberg et Saloner (1989) et Hubbard (1986) justifient le rôle de stock en tant que variable d'amortissement des chocs, elle est étroitement liée au prix. La prise en compte des stocks dans les décisions des firmes traduit selon nous la nécessité de coordonner l'activité de la filière. Cependant, il est probable que cette association correspondent plutôt au lien entre la TC et les capacités de transformation disponibles. Face à l'impossibilité d'obtenir des données historiques sur les capacités de transformation disponibles, nous utilisons la variable du stock de concentré (en milliers de tonnes) pour juger des déséquilibres quantitatifs.

Nous aurions également du, au vu de nos résultats, intégrer une série afin de contrôler l'évolution du pouvoir de marché pour juger de la bonne coordination de la filière. Nous ne l'avons pas fait pour deux raisons. Tout d'abord l'absence de données rendait les seules instruments candidats largement sensible à la multicolinéarité et à l'autocorrélation. Ensuite, si notre raisonnement est valide, nous n'avons pas besoin de contrôler l'évolution du pouvoir de marché des firmes. En effet, la pérennité de la TC en tant qu'instrument nous permet d'affirmer que la distribution du pouvoir de marché n'a pas évolué de façon à biaiser la relation que nous recherchons.

L'existence d'une relation de long terme suppose que les variables de la TC de base, du prix de zinc et du stock de concentré évoluent dans le même sens sans dévier durablement les unes des autres. Cependant, ces variables restent non stationnaires tout en étant reliées par une relation de cointégration (Engle et Yoo, 1987). Un certain nombre d'études sont consacrées à l'identification des relations de cointégration sur les marchés de matières premières. Elles concernent principalement les liens entre les prix de différences matières premières (Giuliodori et Rodriguez, 2015, Gil-Alana *et al.*, 2015) ainsi que les liens entre le prix et le niveau du stock Geman et Smith (2013). Notre travail s'inscrit dans cette lignée, cherchant à identifier les relations entre les variables qui caractérisent les différentes étapes de la filière de production.

Le cadre de notre analyse est déterminé par le délai des ajustements dans l'industrie de zinc, de long à très long terme. Il convient donc de vérifier si les variables considérées présentent des caractéristiques spécifiques correspondant à une tendance commune de long terme. Notre hypothèse ne suppose pas de convergence vers un équilibre de long terme pré-déterminé. L'existence d'une coordination au sein de la filière demande simplement qu'une relation stable dans le temps existe entre les instruments que nous avons choisis. Ainsi tout choc ou déviation

de cette tendance commune va entrainer des ajustements des autres variables ou d'une partie d'entre elles.

Avant de procéder à l'étude de la relation entre les trois variables nous avons tout d'abord analysé les couples de variables : TC-prix du zinc et TC-stock du concentré.

Dans une perspective technique, la TC est un moyen d'assurer l'approvisionnement en métal : a priori on s'attend à une correlation entre le prix du métal et la TC. Ces deux variables sont effectivement corrélées (coefficient de corrélation de 0,569) même si le ratio *TC de base/Prix de zinc* fluctue de 9% à 21% sur la période 1975-2013 (graphique 2.9, chapitre 2). Les deux séries sont issues de processus non stationnaires (DS) et intégrées d'ordre 1. Ainsi, l'existence d'une relation de cointégration [23] entre ces variables permettrait de confirmer notre hypothèse. Cependant, à l'issue de l'étude de ces deux séries de variables on conclut à l'absence de relation de cointégration entre le prix du zinc et la TC de base.

Du point de vue de la coordination, le niveau de la TC a un impact direct sur le niveau du stock de concentré. En effet, le coefficient de corrélation entre ces deux variables est de 0,23. La variable stock est issue d'un processus non stationnaire, elle est intégrée d'ordre 1 et correspond à un processus DS. Le test de la relation de cointégration entre ces deux variables s'avère également négatif. Cette absence de co-mouvement entre les couples de variables est assez contre-intuitive dans le contexte de la filière de zinc.

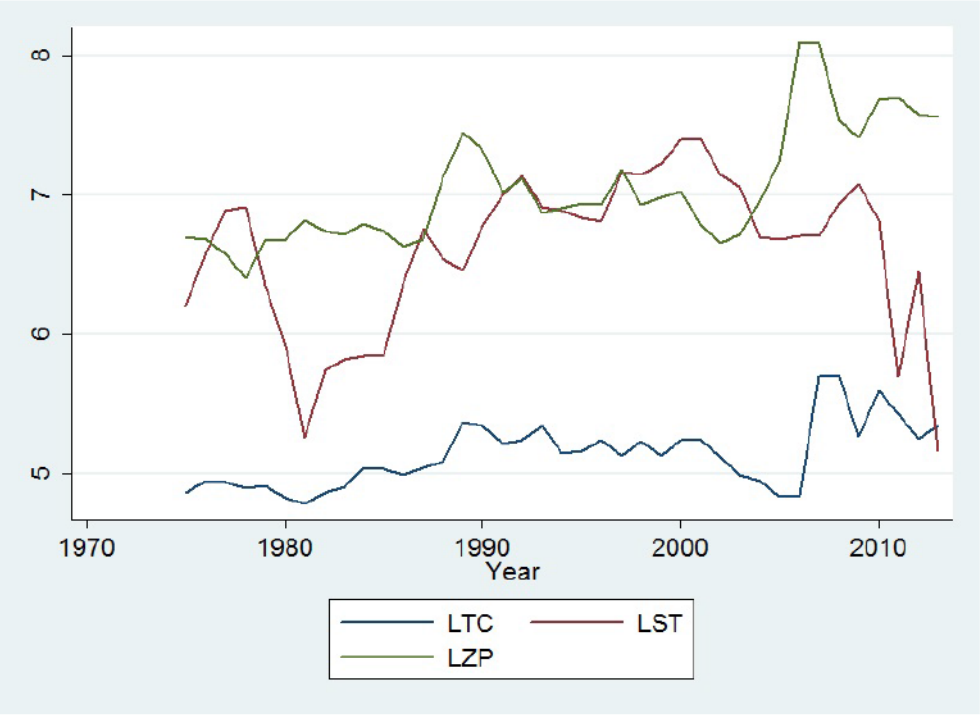
Nous pensons donc que cette conclusion tient à la nature des relations au sein de la filière. Les décisions des firmes sont prises sur la base de l'évolution de plusieurs variables. Il faut considérer ces variables simultanément afin d'avoir une vision d'ensemble des facteurs rentrant dans la décision coordonnée. C'est ainsi que nous justifions notre choix de test de cointégration, basé sur l'étude simultanée des relations entre les trois variables.

Nous réalisons en premier lieu le test de cointégration sur nos variables afin de décider du type de modèle à construire [24]. Si les variables sont cointégrées, nous allons pouvoir construire un modèle à correction d'erreurs ; en cas d'absence de cointégration, l'utilisation d'un modèle VAR serait à considérer.

[23] Les méthodes régulièrement utilisées pour ce type d'analyse sont la procédure en deux étapes de Engle et Yoo (1987) et la méthode de Johansen-Juselius introduite dans Johansen (1988), Johansen et Juselius (1990, 1993, 1994).

[24] Les méthodes régulièrement utilisées pour ce type d'analyse sont la procédure en deux étapes de Engle et Yoo (1987) et la méthode de Johansen-Juselius introduite dans Johansen (1988), Johansen et Juselius (1990, 1993, 1994).

Graphique 1.21: TC de base, prix du zinc et stock de concentré



Source : Auteur

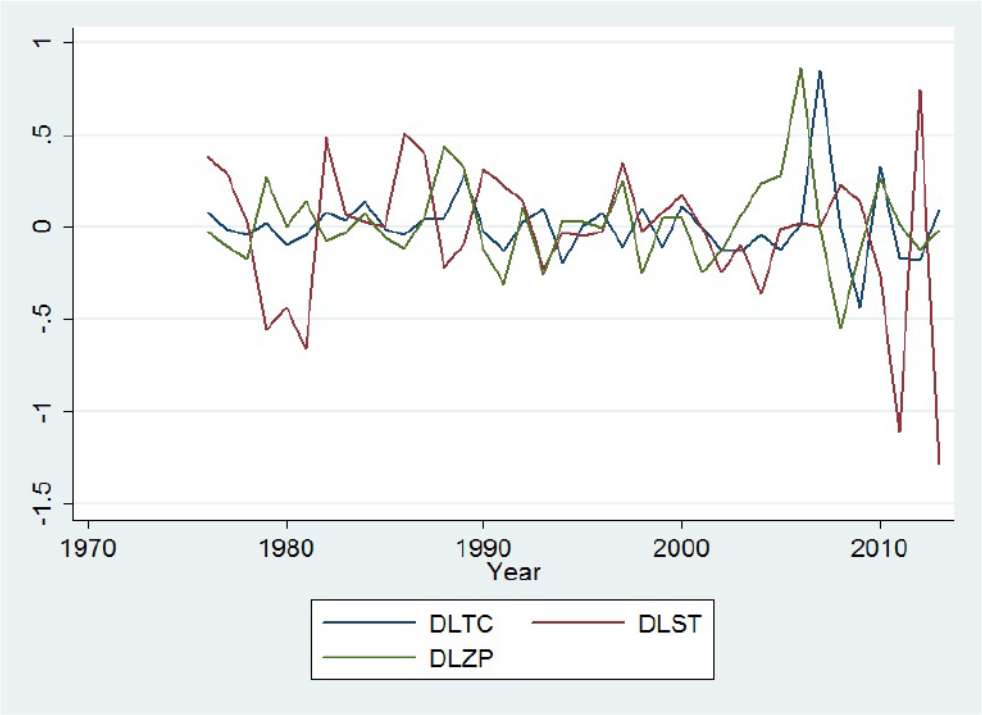
L'hypothèse de base utilisée lors de la procédure standard de l'estimation est celle des séries non-stationnaires intégrées du même ordre dont la combinaison est stationnaire. Afin de vérifier cette propriété de nos séries, nous procédons à la réalisation des tests de Dickey-Fuller Augmentés (ADF) pour chacune des variables utilisées Dickey et Fuller (1979, 1981). Les résultats sont ensuite vérifiés à l'aide du test DF-GLS proposé par Elliott *et al.* (1996) dans lequel les séries temporelles sont transformées via une regression des moindres carrés généralisés avant le test.

Notre base de données contient des variables en logarithmes pour les séries de la TC de base, du prix du zinc annuel et du stock annuel du concentré pour la période de 1975 à 2013 (graphique 1.21). Nous disposons de 38 observations pour chacune de ces séries annuelles. Nous sommes conscients que le nombre d'observations dont nous disposons est assez réduit et limite la portée de cette étude. Les tests de stationnarité confirment la présence de racine unitaire dans les séries considérées. Les trois séries sont stationnaires en différences premières et elles sont intégrées d'ordre 1[25]. Le graphique 1.22 représente les trois séries en différences premières.

Nous procédons ensuite à l'application de la procédure de tests de cointégration selon la technique en deux étapes d'Engle et Granger. La première étape consiste à estimer le vecteur de

[25]Voir l'annexe B pour le détail des tests de racine unitaire.

Graphique 1.22: TC de base, prix du zinc et stock de concentré, variables en différences premières



Source : Auteur

cointégration (relation de long terme) par la méthode des moindres carrés ordinaires. La seconde étape consiste à intégrer au modèle l'estimation du vecteur de cointégration et à estimer les paramètres du modèle.

D'abord nous vérifions que les séries sont conintégrées, ce qui implique la stationnarité des résidus de cette relation de long terme ($I(0)$). Afin de tester la stationnarité du terme résiduel estimé ($\hat{z}^t$) nous appliquons le test de Dickey Fuller Augmenté [26] à nos variables (Les résultats sont présentés dans l'annexe B).

Si l'hypothèse de cointégration est acceptée, alors un mécanisme à correction d'erreur existe et nos variables évoluent de concert. Un modèle à correction d'erreur peut être estimé par la méthode des moindres carrés ordinaires :

$$\delta y_t = \alpha\beta^{'} y_(t-1) + \sum_{i=1}^{p-1} \Gamma \delta y_{t-i} + \nu + \delta_t + \epsilon_t \tag{1.23}$$

[26] Ce test est basé sur les résidus estimés et non pas sur les vraies valeurs des résidus. Il convient dès lors utiliser les valeurs critiques mises en table statistique par Engle et Yoo (1987) ou par McKinnon (1991). Pour plus de détail voir Mignon (2008).

L'expression 1.23 correspond donc au modèle estimé avec α la matrice des poids déterminant la vitesse d'ajustement vers l'équilibre et β la matrice des paramètres déterminant les relations de cointégration[27]. Les coefficients de α proches de zéro impliquent une forte inertie et une convergence lente vers l'équilibre. Le terme $\beta^{'} y_{(}t-1)$ est l'erreur d'équilibre : il mesure la déviation de l'équilibre de long terme. Le terme Γ comprend la matrice des paramètres en relation avec le nombre de retards acceptés par la structure du modèle[28]. La présence de la constante ν implique quant à elle, une tendance linéaire en niveau et la présence de la tendance δ_t correspond à une tendance quadratique des données en niveau.

La détermination de la structure du modèle est faite sur la base des critères d'information. L'utilisation d'un modèle avec un seul retard semble approprié car elle minimise le critère d'information de Schwartz (Voir l'annexe B pour l'ensemble des statistiques des critères d'information.), alors que les critères HQIC, AIC, FPE et LR suggèrent l'utilisation de trois retards. Dans un souci de réaliser une parcimonieuse nous avons retenu un modèle à un retard, minimisant le critère d'information.

Une fois que nous avons défini le type de modèle à utiliser, nous procédons à la réalisation du test de Johansen (1988, 1991, 1995) visant à identifier le nombre de relations de cointégration (vecteurs de cointegration) reliant ces variables. Ce test fournit les valeurs de statistiques de test de la trace et des valeurs propres [29] (Tableau des résultats disponibles dans l'annexe). Cinq configurations peuvent être testées, à savoir le modèle avec tendance, le modèle contraint avec tendance, le modèle avec constante, le modèle contraint avec constante ainsi que le modèle sans constante ni tendance. Puisqu'aucune des variables n'est stationnaire autour d'une tendance, le modèle avec constante dans l'espace de cointégration et celui avec constante hors de l'espace de cointégration ont été testés.

Nous rejetons l'hypothèse nulle de $r = 0$ sur la base de la valeur de la statistique de test (supérieure à la valeur critique au seuil de 5%) en faveur de l'hypothèse alternative de l'existence d'au moins une relation de cointégration ($53.66 > 29.68$). L'hypothèse nulle de $r = 1$ n'est pas rejetée au seuil de 5%, la statistique de test est inférieure à la valeur critique ($8.67 < 12.41$). On conclue par conséquent, qu'il existe au moins une relation de cointégration qui relie la TC, le prix du métal et le stock du concentré. L'existence de cette relation témoigne donc de l'évolution de ces variables vers l'équilibre de long terme.

[27] Voir Mignon (2008), Bourbonnais (2015) et Kolenikov (2003), Kpodar (2007), Stata Corp. (2009) pour plus de détail sur la formalisation des modèles à correction d'erreurs avec variables cointégrées.

[28] En pratique, le nombre de retard est estimé à l'aide des critères d'information tels que Akaike (AIC), Schwartz (SBIC) ou Hannan-Quinn (HQC).Ces critères sont complétés par LR et FPE dans Stata.

[29] Le calcul des valeurs propres se base sur l'hypothèse nulle de l'existence de r relations de cointégration contre une hypothèse alternative de l'existence de r+1 relations de cointégrations avec $r = 0, 1, \ldots, n-1$.

III.2.2 Modélisation des dynamiques de long terme entre les variables

L'existence d'une relation de long terme entre ces trois variables nous permet de procéder à l'estimation du modèle de correction d'erreurs (Tableau 1.5). L'estimation est obtenue par la maximisation Gaussienne de la fonction de vraisemblance. Nous imposons l'ordonnancement des variables sur la base de la théorie économique[30] appuyée par les tests de causalité selon la méthode de Granger (Granger et Newbold, 1974, Granger, 1981, Engle et Granger, 1987). Ainsi, la première variable est la TC, puis vient le prix du zinc, ensuite le stock du concentré.

Tableau 1.5: Estimation des coefficients de long terme

Variable	Coefficient	(Std. Err.)
Equation de cointégration		
LTC	1	.
LZP	-.414***	(0.466)
LST	-.125***	(0.368)
Intercept	-1.411	.

Source : Auteur

*, ** et *** indiquent une significativité à 1%, 5% et 10% respectivement

La relation de long terme entre la TC de base, le prix du zinc et le stock du concentré pour la période de 1975 à 2013 est formalisée par l'équation 1.24 (les tests de la stabilité du modèle sont fournis dans l'annexe B) :

$$LTC = -0.41LZP - 0.13LST - 1.41 \tag{1.24}$$

Les coefficients ainsi obtenus[31] peuvent être interprétés comme des élasticités de long terme (Cuddington et Dagher, 2011, Cuddington et Jerrett, 2011). Une appréciation de 1% du prix de zinc entraîne alors une réduction de la TC de base de 0.41%. Ce résultat confirme l'importance du revenu de "free metal" obtenu par les transformateurs : en situation de hausse du prix, ils sont prêts à accepter une TC plus faible. De plus, une appréciation du niveau du stock de concentré de 1% conduit à une réduction de la TC de 0.13%.

Cette conclusion est plus discutable, car à priori un surplus du concentré est souvent associé à une TC plus élevée. Il se pourrait que l'information contenue dans la variable du stock du

[30] Voir les travaux de Rao (2008) et de Dées *et al.* (2007) sur les liens entre les variables de prix et de stock sur le marché du pétrole et des produits dérivés.

[31] Tous significatif au seuil $\alpha = 95\%$. Voir l'annexe B pour l'ensemble des données de regression.

concentré ne permet pas de confirmer cette conclusion. Pourtant, d'autres variables, telles que les capacités de transformation inoccupées, le nombre de firmes fonctionnant à pleines capacités pourraient être des estimateurs intéressants pour tester l'hypothèse de la relation entre la quantité du concentré et la TC de base.

Tableau 1.6: Coefficients d'ajustement du modèle à correction d'erreur

Variable	Coefficient	(Std. Err.)
Equation 1 : D_LTC		
D(TC de base)	-0.893***	(0.113)
Intercept	-0.011	(0.019)
Equation 2 : D_LZP		
D(Prix d zinc)	-0.465***	(0.218)
Intercept	0.010	(0.037)
Equation 3 : D_LST		
D(Stock)	0.223	(0.389)
Intercept	-0.022	(0.067)

Source : Auteur

*, ** et *** indiquent la significativité à 1%, 5% et 10% respectivement Les variables TC de base, Prix du zinc et Stock sont en logarithmes

Le tableau des coefficients d'ajustement 1.6 montre que la TC de base et le prix de zinc répondent aux chocs en convergeant à l'équilibre de long terme, les coefficients sont négatifs et significatifs. La force de rappel est donc plus importante pour la TC caractérisant un phénomène de retour à l'équilibre rapide et presque complet au cours d'une période. Cependant, selon notre modèle, le stock ne converge pas à l'équilibre de long terme et ne contient pas de force de rappel significative.

Les coefficients estimés de la relation de long terme permettent de juger des effets de chocs externes sur la dynamique du système étudié. Nous utilisons les fonctions de réponse impulsionnelle pour illustrer les conclusion sur la relation de long terme qui existe entre les variables de notre modèle (graphique 1.23).

Par ailleurs, tous les chocs modélisés sont de nature permanente et affectent l'ensemble des variables du modèle. Nous commençons nos tests de réponse par la TC. Un choc positif de la TC (LTC) se traduit par un effet négatif sur le prix du zinc (LZP). Ainsi, 20% de la variance induite par le choc survient la première année, puis 60% durant les trois années suivantes. Un choc positif sur la TC (LTC) entraîne également une hausse du stock de concentré (LST). Néanmoins, l'impact de ce choc est assez faible et sa contribution à la variance de l'erreur ralentit avec le temps.

L'effet d'un choc positif du prix de zinc (LZP) sur la TC (LTC) est positif, avec un impact important lors de la première année. Un choc positif du prix de zinc (LZP) sur le stock du concentré (LST) a un effet négatif. Néanmoins l'impact sur le stock n'est pas important compte tenu de sa faible part en pourcentage dans la décomposition de la variance.

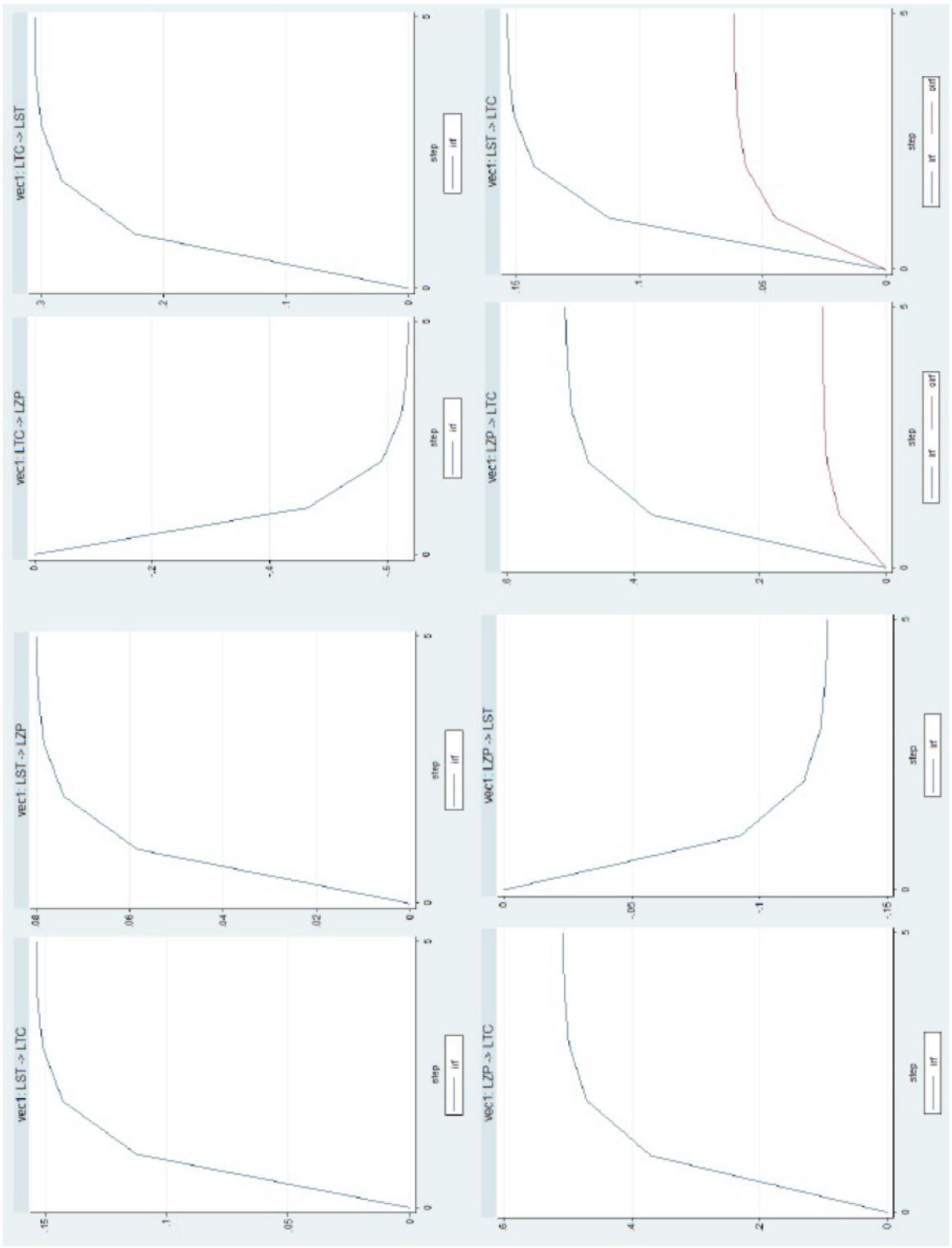
La TC (LTC) répond positivement à un choc positif du stock du concentré (LST), mais cette réponse reste assez peu prononcée. Enfin, un choc positif du stock (LST) se traduit par une hausse permanente du prix de zinc (LZP). Cet impact est également de très faible ampleur, la variance du prix du zinc est donc peu sensible au choc du stock du concentré.

Les résultats de la relation de court terme du modèle confirment donc la tendance de long terme : une fois contrôlé, le niveau du stock de concentré, les chocs de prix positifs ont un impact négatif sur la TC. Le modèle montre aussi une importante force de rappel à long terme. Ceci nous permet d'établir, via nos instruments, qu'il existe bien un équilibre de filière, défini à la fois par un niveau de prix du métal, un niveau de TC ainsi que par un niveau de stock du concentré. Tout choc sur l'une ou l'autre de ces variables entraine une déviation temporaire de l'équilibre de la filière, pour autant l'ajustement se fait en moins de 5 ans.

Les résultats obtenus sont concluants concernant la nature de la TC dans le cadre de l'hypothèse 1. Ces résultats doivent néanmoins être nuancés en raison du nombre très limité d'observations à notre disposition (38 points). Nous ne procédons donc pas à l'estimation des valeurs futures des variables en raison de la portée limitée de notre modèle (les intervalles de confiance sont trop larges et il est impossible de procéder à une prévision détectable).

L'existence d'une relation de long terme entre la TC, le prix du zinc et le stock de concentré ouvre une large perspective au processus de la TC. La coordination de la filière a lieu via des négociations intégrant ces trois variables. C'est donc bien un accord sur un équilibre technique, qui garantit les approvisionnements de chacun et qui donne sa relative stabilité au marché du zinc.

Graphique 1.23: Fonctions de réponse impulsionnelle



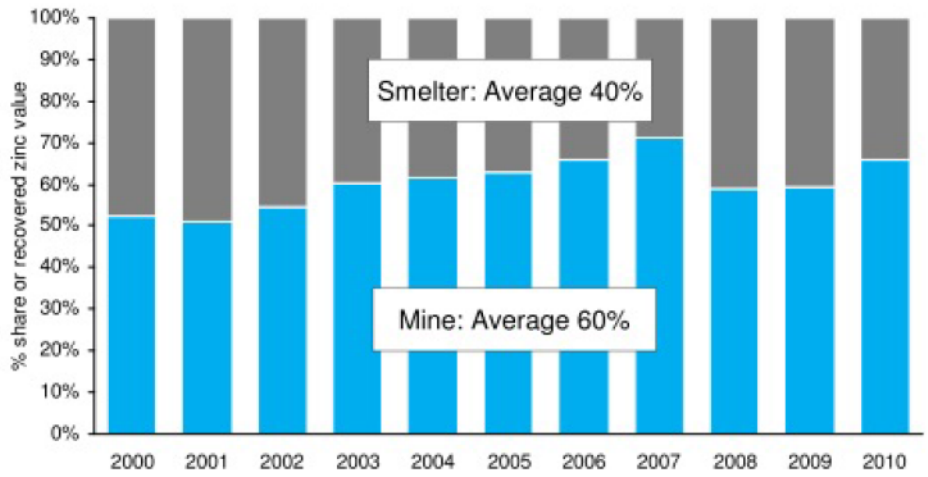
Source : Auteur

III.2.3 Partage du profit et TC dans un oligopole bilatéral : quelles alternatives ?

L'utilisation de la TC en tant que variable d'équilibre technique implique pourtant l'acceptation par toutes les firmes du niveau de la TC et des règles de partage de profit qui en découlent. La possibilité même du partage du profit est étroitement liée à la structure de la filière permettant ainsi aux firmes de réaliser un profit non nul. Nous avons discuté précédemment l'organisation de la filière comme relevant d'un oligopole bilatéral et montré comment la TC ne pouvait se maintenir que dans cette structure de marché. Il nous faut maintenant regarder de plus près la distribution empirique des profits dans la filière avant de consacrer la TC comme meilleur instrument disponible pour la coordination de la filière.

L'évolution des parts du mineur et du transformateur sur la période 2000-2014 dans le revenu du prix du zinc est illustrée par le graphique 1.24. Environ 40% de la valeur du zinc produit reviennent au transformateur et environ 60% appartiennent au mineur. Ces valeurs fluctuent d'une année à une autre, mais elles témoignent d'une hausse de la part des mineurs au détriment de la part des transformateurs, déjà inférieure à celle du mineur en début de période. On note que les périodes où la part des transformateurs a été plus importante correspondent à des périodes où la TC est élevée. De plus, les variations du prix du métal ne semblent pas jouer un rôle prédominant dans les proportions du profit obtenu par les mineurs et par les transformateurs.

Graphique 1.24: Partage du profit entre les mineurs et les transformateurs de zinc



Source : NYRSTAR (2011)

Le détail de l'évolution du montant réel obtenu par les mineurs et les transformateurs (ce montant tient compte des fluctuations du prix du métal) confirme cette première impression. La figure 1.25 illustre la perte progressive du revenu des transformateurs. La récente période

Graphique 1.25: Partage observé du profit entre les mineurs et les transformateurs



Source :NYRSTAR (2011)

de hausse du prix de zinc a surtout profité aux mineurs mais aussi dans une moindre mesure aux transformateurs. L'écart entre la part du mineur et du transformateur dans le prix du métal s'explique principalement par le faible revenu du métal qu'obtient le transformateur. En revanche, entre 2005 et 2007, les transformateurs ont presque doublé le revenu de la TC par rapport à la TC de base grâce à l'application des coefficients de variation.

Notons que le mécanisme de partage du profit est appelé par les professionnels « profit sharing ». Il s'agit du ratio qui désigne les proportions du prix du métal reçues par les mineurs et les transformateurs. Le calcul est basé sur la détermination du rendement net par tonne du concentré *Net Smelting Return (NSR)* détaillée dans l'encadré 1.5. Il est obtenu en tant que résultat de vente du métal après déduction de toutes les charges incluant la TC, le coût de transport, le coûts d'assurance ainsi que des coûts financiers divers.

On constate également que le mécanisme de partage du profit basé sur la TC fonctionne. En revanche, compte tenu des déséquilibres quantitatifs constatés et de l'interdépendance des firmes au sein de la filière, le partage du profit entre les mineurs et les transformateur ne peut pas être considéré comme équitable. La raison de ce partage asymétrique est à chercher dans une asymétrie contenue mais réelle du pouvoir de marché des mineurs et des transformateurs. Les mineurs ont un pouvoir de marché légèrement supérieur à celui des transformateurs, ce qui leur permet de capter plus de profit sans pour autant en récupérer la totalité. Une autre raison potentielle a cette asymétrie pourrait venir d'un risque plus élevé supporté par le mineur. Nous reviendrons sur cette possibilité dans les chapitres suivants.

Encadré 1.5: Calcul du rendement net (NSR)

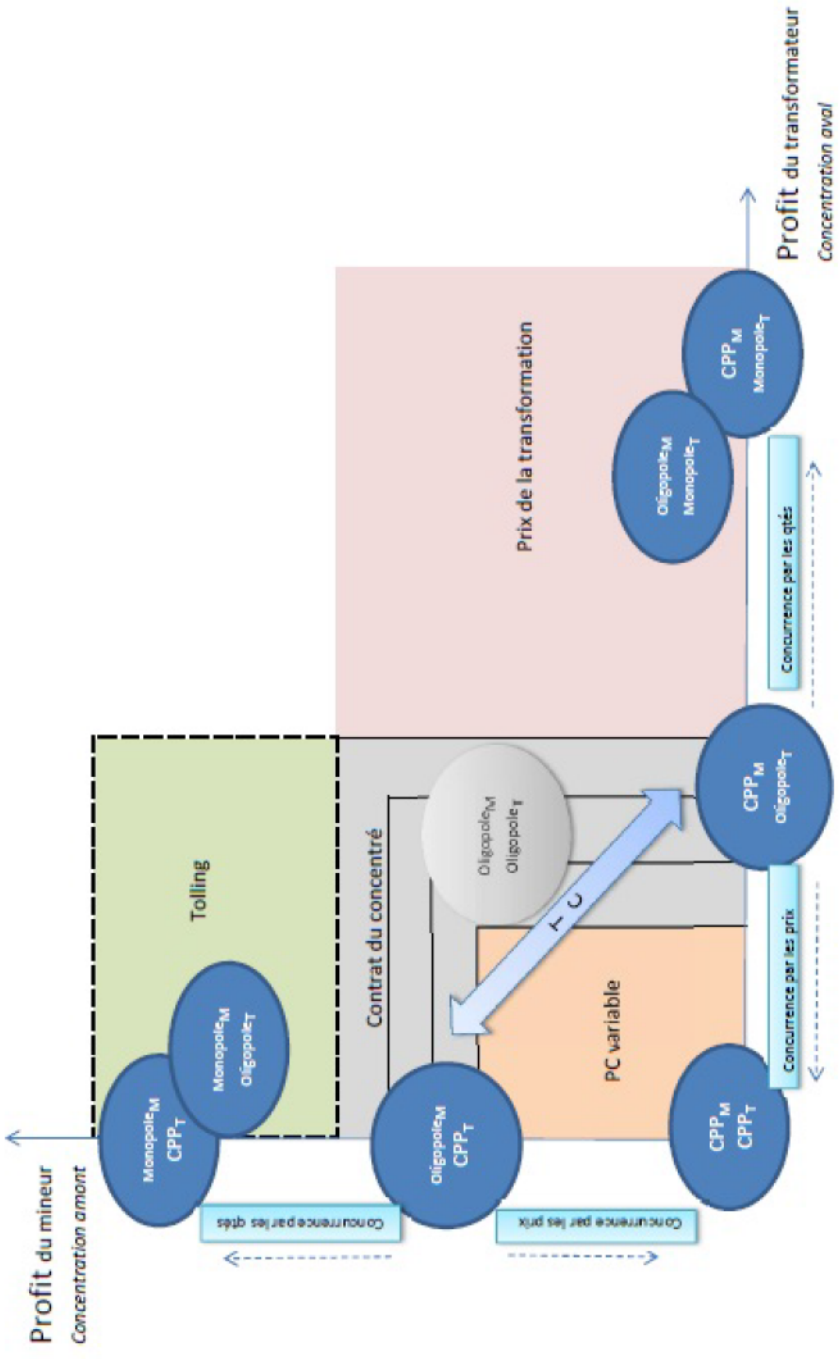
Nous utilisons un exemple de Goldie (1991) pour détailler ce calcul du rendement net pour le concentré du zinc avec le contenu métallique de 51% Zn. La valeur du métal contenu dans une tonne du concentré est de 765$/t, la part du métal payable est de 85%. On enlève de cette valeur l déduction unitaire ce qui correspond au montant du métal payable de 637$/t. On enlève de ce prix le montant de la TC (210$/t) et des frais divers (transport, assurance, financement) qui s'élèvent à 38 $/t. Le rendement net ainsi obtenu est égal à 389 $/t représentant 50.8 % de la valeur du zinc contenu dans le concentré. Compte tenu du fait que le taux de recouvrement du zinc est de 93%, on obtient un revenu net de la mine égale à 43% de la valeur brute du concentré.

La TC produit donc un partage du profit inégalitaire mais prévient aussi toute confiscation intégrale par l'un ou l'autre des acteurs. Par ailleurs, d'autres filières de matières premières ont recours à des mécanismes de coordination différents de la TC. Les deux cas extrêmes correspondent au *tolling* (solution appliquée sur le marché du pétrole) et la libre fixation du prix (méthode utilisée sur les marchés des matières premières agricoles). Reste à savoir si ces différences ont des raison historiques, ou si elles peuvent s'expliquer par des structures de marché différentes.

Le contrat de *tolling* correspond à un contrat de transformation où une firme (toller) fournit à une autre firme (transformateur) la matière première devant être transformée. Ce contrat évite donc l'investissement des transformateurs dans l'infrastructure ou dans la logistique tout en allouant ces fonctions au toller, mieux placé pour gérer les flux (Avdasheva, 2002). Cette solution s'applique aux industries où les mineurs ont clairement un pouvoir du marché disproportionné par rapport aux transformateurs. Ainsi les mineurs obtiennent une grande partie du profit de l'industrie : le profit total en situation du monopole et un profit inférieur mais non nul en situation d'oligopole.

A l'opposé du *tolling* on trouve l'utilisation du prix de la transformation pour rémunérer le transformateur. Dans ce cas de figure les mineurs et les transformateurs sont *price-takers*, les profits des firmes sont nuls. Nous résumons les profits associés aux différentes structures de la filière à l'aide d'une matrice de profits (graphique 1.26).

Graphique 1.26: Matrice des profits du mineur et du transformateur en fonction de la structure de la filière et des transactions



Source : Auteur

La matrice des profits permet de mettre en évidence le lien entre la structure de la filière et le profit réalisé par les firmes en amont et en aval. Le partage de profit est réalisé uniquement par les firmes se trouvant en situation de concurrence imparfaite. Le profit maximal est atteint par une partie des firmes de la filière, lorsqu'elles ont en face des industriels ayant une structure qui se rapproche de la CPP. Ainsi, l'usage de tolling est propre aux filière avec une forte concentration des firmes en amont de la filière (industrie pétrolière), alors que le prix de transformation s'applique en situation de concentration importante en aval.

Ces deux cas extrêmes caractérisent les filières où un type de firmes impose ses conditions aux autres firmes de la filière. En situation de l'oligopole bilatéral, lorsque les firmes souhaitent coopérer, il est important de s'entendre sur une variable de transfert. L'usage d'une variable benchmark (TC) est donc une solution qui convient à la totalité des firmes de la filière.

Le contrat du concentré assure un niveau de profit plus élevé que l'usage du prix du marché (situation identifiée sur la matrice par "PC variable"). Cette différence vient de la possibilité dont disposent les firmes de négocier le niveau consensuel pour la TC. Ce consensus permet donc aux firmes d'éviter la concurrence par les prix ou par les quantités, si fréquentes en oligopole.

L'ensemble de ces observations conclut cette seconde partie de chapitre. Nous y avons formalisé trois fonctions pour la TC dans le cadre de l'hypothèse 1. Si la TC est un instrument de coordination pour la filière, elle permet une véritable gestion de filière des stocks et des flux, elle sert à éviter le développement d'un pouvoir de marché excessif et elle fournit un mécanisme d'assurance et de compensation garantissant à chacun un niveau de profit acceptable. Nous avons, en conséquence, testé l'hypothèse 1 en cherchant une relation de long terme entre le prix du zinc métal, la TC et le niveau des stocks. Nous concluons qu'il existe bien une relation de long terme et une réactivité importante de la TC au prix du métal et inversement.

Nous constatons également une répartition inégale du profit entre les mineurs et les transformateurs. Les mineurs ont systématiquement bénéficié d'une part de profit plus importante. Cette conclusion ne met pas en doute l'utilisation de la TC en tant que benchmark, mais pousse à la comparaison de la TC avec d'autres solutions de valorisation utilisées sur les marchés des matières premières. Nous comparons les profits réalisés au sein de la filière sur la base des différences de la structure. Nous en concluons que le fonctionnement de la TC en tant que variable benchmark n'est possible qu'en situation d'oligopole bilatéral non intégré verticalement.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons identifié le rôle de la TC en tant que variable repère ou benchmark coordonnant les échanges entre les mineurs et les transformateurs. Elle détrône alors le prix du concentré pour assurer le partage du profit de la vente du métal entre les firmes de la filière. On peut donc considérer la TC comme un "prix négocié" qui traduit le besoin de coordination lié aux cinq contraintes de l'industrie ainsi que le rapport des forces entre les mineurs et les transformateurs.

Les firmes procèdent aux échanges du concentré dans un cadre assez règlementé visant à fournir un outil de valorisation au concentré de zinc. La structure de l'industrie semble alors être l'un des facteurs explicatifs de ce type particulier de valorisation : on est en présence d'une filière non-intégrée verticalement avec un nombre limité des offreurs et de demandeurs. Selon M.Yoshikawa de BHP Billiton « Mining and smelting are like a single entity : they co-exist. To destroy that relationship is senseless » (Meggan, 2006). Nos conclusions sur la nécessité de coordination de de la filière vont dans le sens de ce constat.

De plus, les firmes composant cette industrie se basent sur des éléments négociés du contrat du concentré afin d'éviter la concurrence par les prix et par les quantités et de partager le profit. En étudiant la façon dont le profit a été partagé entre ces deux types de firmes nous déduisons que les mineurs ont systématiquement profité davantage de ce partage que les transformateurs. Cet écart de profits crée par conséquent des tensions entre les deux types des firmes et, à terme, risque de causer un déséquilibre quantitatifs au sein de la filière.

La négociation de la TC est alors l'occasion pour les firmes d'exprimer leurs souhaits d'ajustement et de se mettre d'accord sur la coordination de ces ajustements. Les négociations et les transactions entre les mineurs et les transformateurs revêtent des caractéristiques conformes à la description de Postel (2003) : «ils deviennent progressivement spécifiques à mesure que les deux contractants développent une relation mutuelle marquée par l'existence de routines et de services spécifiques non standardisables fondés sur l'existence d'une compréhension tacite ».

La TC représente donc une variable d'équilibre technique traduisant le pouvoir du marché des firmes en fonction de leur positionnement au sein de la filière. Le niveau de la TC demandé est interprété par les sociétés concurrentes en tant qu'anticipation de l'équilibre quantitatif. La TC correspond davantage à un actif à spécificité temporelle dans le sens de Williamson (1999). La dimension stratégique de la TC se traduit également par la diminution de l'incertitude dans les conditions de l'information imparfaite. Par ailleurs, la quantité d'équilibre à produire correspond à la quantité efficiente, ceci indépendamment du niveau de la consolidation de l'industrie

(voir à ce propos les conclusions de Björnerstedt et Stennek (2001) sur les négociations dans le cadre de l'oligopole bilatéral).

La relation entre les mineurs et les transformateurs peut alors être caractérisée comme une relation d'entente tacite et de confiance, car en dehors du profit supplémentaire, elle procure également l'assurance de son caractère durable. La TC est donc une variable d'équilibre technique permettant aux firmes de la filière de gérer les flux de matière. On caractérise également la TC en tant qu'indicateur du pouvoir de marché des firmes de la filière. Cependant, l'utilisation de la TC témoigne d'un pouvoir de marché limité où aucun type de firmes n'est considéré comme dominant. Nous sommes en présence d'un double conditionnement des opérations de la filière. Tout d'abord, l'utilisation de TC permet de maintenir la structure existante de la filière en oligopole bilatéral. Inversement, la structure de la filière, telle qu'elle identifiée, conditionne l'existence de la TC en tant que mécanisme de coordination.

L'hypothèse 1 est alors validée par le rôle des stocks dans l'ajustement des quantités échangées mais aussi par les déterminants des variations de la TC. Les niveaux de la TC sont fixés de façon à garantir une répartition économiquement soutenable des profits de la filière, à assurer les approvisionnements et à contrôler indirectement les entrées et les sorties des firmes sur le "marché du concentré. Mais les échanges de concentrés ne sont pas dépourvus de dimension concurrentielle : les comportement opportunistes visant à accaparer profits et parts de marché restent possible. La filière est donc en concurrence imparfaite, plus proche de l'oligopole bilatéral que de la véritable entente.

Au vue de ces éléments, nous concluons que la TC correspond à une variable de "prix géré" permettant de coordonner les activités de la filière. La TC est un instrument de négociation avec les quasi-propriétés d'un prix de marché, d'où le terme de "prix géré". Ses niveaux se rapprochent d'un prix en CPP dans le temps long. Néanmoins son caractère "géré" (négocié) permet la coordination de la filière ainsi qu'une distribution soutenable, quoique sujette à tensions et concurrence, du profit global entre mineurs et les transformateurs. Les négociations produisent un benchmark, la TC de base, qui donne un cadre de soutenabilité générale pour l'ensemble des acteurs de l'oligopole bilatéral. Les forces de marché, que l'on retrouve dans la TC spot, ajustent ce benchmark aux conditions particulières de chacun.

Sur la base de la matrice des profits, on conclut que les firmes n'ont pas intérêt à utiliser un prix du marché plutôt que la TC, car elles verraient disparaître les avantages que leur procure la TC négociée. Même si la TC se comporte de facto comme un "prix géré", elle ne permet pas d'éliminer les imperfections de marché et les firmes inefficaces, conduisant alors à une situation sous-optimale. Les firmes ne sont donc pas incitées à obtenir les gains de productivité et l'utilisation ne peut pas être considérée comme efficace. Le test de l'hypothèse 2 permet de

vérifier si l'utilisation de la TC en tant que variable de prix est plus intéressante en termes d'optimum social. Le chapitre 2 est donc logiquement consacré à l'hypothèse selon laquelle la TC correspond à une variable de prix dans les échanges du concentré.

Chapitre 2

La TC en tant que prix dans un système de prix relatifs

Sommaire

Introduction **101**

I Le rôle central du prix dans l'analyse en équilibre de marché **103**

I.1 Hypothèses associées aux prix dans la modélisation économique 104

I.2 Quel prix pour le marché du concentré ? 114

II La modélisation de la TC dans le cadre de l'équilibre partiel **130**

II.1 Interactions entre les mineurs et les transformateurs dans le cadre d'un marché 130

II.2 Modèle calculable d'équilibre simultané sur le marché du concentré et le marché du métal 137

III La TC en tant que quasi-prix : validation **144**

III.1 Stratégie empirique visant la validation de la TC en tant que prix 144

III.2 La TC en tant que prix : quel sentiment de marché ? 157

Introduction

"Worthwhile things that have never been done can only be done by means that have never yet existed"

Sebastian Seung

Nous avons conclu le chapitre précédent en identifiant le rôle de variable négociée d'équilibre technique joué par la TC. Dans cette optique, les firmes de la filière déterminent d'abord les quantités produites et consommées considérées comme quantités d'équilibre. Ensuite, elles procèdent à la validation du niveau de la TC d'une manière consensuelle, en tenant compte des contraintes de production. Cette organisation de production permet de maintenir stable le nombre des firmes sur le marché et les capacités de production dont elles disposent, éliminant ainsi toute tentative de modification des quantités par une firme en particulier.

Dans ce chapitre, nous proposons une autre vision de la TC basée sur l'hypothèse 2 (présentée au chapitre précédent) selon laquelle la TC correspond à un prix. Cette hypothèse est testée dans les conditions de concurrence pure et parfaite, où les firmes sont alors considérées comme preneuses de prix. Les firmes acceptent le niveau de la TC, déterminé par le marché, et ajustent les quantités en fonction de ce niveau. L'ordre des ajustements prix-quantités sous l'hypothèse 2 est donc l'exact opposé de celui de l'hypothèse 1.

La TC a été pensée comme le prix unique de la transformation dans le système de prix producteurs qui dominait la filière de zinc dans les années 60 (Woodward, 1965). Au fil des années, le fonctionnement de la TC s'est éloigné de ce rôle de variable de prix, donnant une place de plus en plus large à la négociation. L'intérêt de l'hypothèse 2 est donc d'évaluer ce qui reste, en terme de contenu informationnel, de ce rôle de prix dans la TC actuelle. Il est également intéressant de dégager, partant de ce résultat, ce qui aujourd'hui éloigne le mécanisme de la TC actuelle.

En imposant un cadre de CPP à notre modélisation, on élimine toute coordination formelle entre les firmes, génératrice d'imperfections. Cette hypothèse forte est éminemment discutable dans le cadre de la filière du zinc comme nous venons de le voir au chapitre 1. Nous proposons donc cette hypothèse dans l'esprit de notre démarche d'analyse, en tant qu'un instrument d'évaluation d'une vision de la TC. Cette vision implique d'analyser les réactions des firmes à une TC donnée, contenant une information parfaite et publique, et d'observer si émerge au sein de la filière "l'ordre spontané" dans le sens de Hayek (1980).

Malgré l'apparente simplicité de notre objectif, peu de travaux de recherche appliquée ont été consacrées à la confirmation d'instruments de marché en tant que variables de prix. Nous avons donc dû définir une méthodologie de test à partir de la littérature existante adaptée à notre objectif et à la spécificité du phénomène étudié. Nous proposons une stratégie de test basée sur une validation conjointe des fonctions théoriques du prix et des propriétés empiriques de la série étudiée. La validation théorique fait appel à l'identification des fonctions du prix et à la modélisation de la TC en tant que variable de prix dans un cadre d'équilibre partiel. La validation empirique passe par la caractérisation du processus autoregressif à l'origine des variations de la TC, témoin de la convergence de la TC vers un niveau d'équilibre de marché.

Si la TC était un prix, elle remplirait les fonctions théoriques du prix. Selon (Friedman, 1953, Friedman et Friedman, 1979) le prix dans un système de prix relatifs remplit les fonctions de 1) transmission de l'information sur l'offre et la demande, 2) de répartition des revenus et 3) d'incitation des producteurs à la recherche des gains les plus élevés. Nous basons notre validation théorique sur l'identification des fonctions de la TC et leur cohérence avec les fonctions remplies par une variable de prix (Section I). Nous constatons que la TC remplit les fonctions d'un prix même si son utilisation actuelle ne correspond pas à celle d'une variable de prix. Nous en identifions les raisons, en évoquant principalement les changements techniques et l'évolution du rapport de force au sein de la filière. L'utilisation d'une variable de prix nécessiterait une standardisation du concentré et impacterait en premier lieu les transformateurs, ces derniers sont donc particulièrement réticents à l'introduction d'une variable de prix.

La validation théorique de cette vision de la TC ouvre sur une modélisation du marché où la TC correspond à une variable de prix (Section II). Nous intégrons la TC dans les programmes de maximisation du profit du mineur et du transformateur pour en déduire l'offre et la demande de concentré. Issue de l'équilibre du transformateur, la demande de concentré est fonction de la TC. Nous postulons un marché du concentré indépendant par analogie : si la TC est une variable de prix, la production de concentré correspond à l'offre et les commandes des transformateurs représentent la demande.

Les transformateurs jouent alors le rôle de transmetteurs de l'information révélée sur le marché du concentré à celui du métal via la TC, du fait de leur présence sur les deux marchés. L'équilibre du mineur est déterminé simultanément par la TC et le prix du métal. Compte tenu du fait que le prix du métal n'a pas d'impact sur les décisions des transformateurs, seule la TC participe à la détermination des quantités offertes et demandées de concentré. Nous en concluons que la TC doit fluctuer librement pour que les firmes produisent des quantités optimales au sens de Pareto. Les interactions entre ces deux marchés sont explorées à l'aide du modèle théorique de l'équilibre partiel simultané sur les deux marchés. La TC, en tant que seule

variable affectant le profit du transformateur, détermine indirectement le lien entre le marché du concentré et le marché du métal ainsi que l'équilibre quantitatif sur les deux marchés.

En raison d'ajustements quantitatifs longs, la filière de zinc peut s'analyser dans le cadre d'une modélisation de type Cobweb (Ezekiel, 1938), où la demande s'ajuste immédiatement aux variations de prix, alors que l'offre s'ajuste avec une période de retard. Si la TC est un prix, elle se comportera comme un prix. La transcription empirique des trois fonctions de prix de Friedman est donnée par un processus autoregressif d'ordre 1 où le niveau de prix dépend de ses observations passées récentes. Dans ce cadre de modélisation, nous définissons la TC comme un processus AR(1), ce qui permet de valider a priori l'hypothèse 2 selon laquelle la TC se comporte comme une variable de prix (Section III).

Nous introduisons ensuite une différence qualitative entre la TC de base, qui est un processus AR(2), et la TC réalisée, qui est un processus AR(1). La validation de la TC en tant que prix n'est donc pas parfaite. Pourtant, les résultats du questionnaire confirment que les variations de la TC sont jugées par les firmes comme étant liées à l'offre et la demande de concentré. La TC aurait ainsi autant d'importance dans les décisions des firmes que le prix du métal. Sur la base de ces éléments, une interprétation s'impose : la TC ne correspond pas à une variable de prix, mais se comporte de facto comme telle.

Les résultats des tests de l'hypothèse 2 nous permettent de conclure que l'utilisation de la TC est préférable à l'utilisation de la TC benchmark. Théoriquement l'utilisation de la TC en tant que prix apporte plus de transparence et d'efficacité. Or, cette solution est inatteignable en raison de la structure existante du marché et des hypothèses fortes émises dans le cadre de notre modélisation (CPP). La TC se comporte donc en quasi-prix, sans pour autant être une variable de prix. Nous proposerons dans le dernier chapitre une synthèse entre ces conclusions issues du cadre concurrentiel et notre analyse du précédent chapitre.

I Le rôle central du prix dans l'analyse en équilibre de marché

Cette première section théorique est dédiée à la formulation du cadre conceptuel sur lequel repose la modélisation des deux sections suivantes. Pour valider l'hypothèse selon laquelle la TC est un prix, nous devons identifier au préalable les rôles et les fonctions potentielles d'un prix, ainsi qu'identifier le type de prix qui serait le plus approprié à notre modélisation.

Les hypothèses formulées dans ce chapitre nous permettent de mieux définir le cadre de notre analyse et de poser un certain nombre de questions formant la base de notre raisonnement. Quand apparaît le prix sur le marché ? Comment identifier une variable de prix ? Quelles sont ses caractéristiques ? En quoi l'existence du prix va modifier les situations individuelles des agents sur le marché (des mineurs et des transformateurs impliqués dans l'échange du concentré) ?

Nous procédons ensuite à l'identification des caractéristiques de la TC plaidant en faveur de son utilisation pour remplir les fonctions du prix. La valorisation du concentré, malgré son caractère calculé, est un candidat naturel pour représenter l'équilibre entre l'offre et la demande de concentré. Or, c'est bien la TC et non pas le prix du concentré, qui remplit les fonctions de prix sans pour autant être identifiée formellement comme tel. Cette situation est d'autant plus paradoxale que la TC a été pensée à l'origine comme une variable de prix.

Nous présentons finalement l'asymétrie fondamentale entre le mineur et le transformateur qui découle de l'identification de la TC comme prix du concentré : le contenu informationnel de la TC est suffisant pour le transformateur, mais pas pour le mineur. Nous proposons alors des scénarios de statique comparative pour évaluer la position de chacun pour différents niveau de la TC. Le cadre théorique ainsi obtenu sert de base à la modélisation formelle de la TC pour trouver un niveaux de prix optimal dans la section II.

I.1 Hypothèses associées aux prix dans la modélisation économique

I.1.1 Le rôle du prix dans un système de prix relatifs

L'étude des prix par les économistes a permis de dégager deux descriptions principales des prix. On trouve tout d'abord les prix relatifs, issus des modèles en équilibre général. Dans ce cadre d'analyse le prix en numéraire n'a de valeur qu'en tant que partie d'un prix relatif traduisant les termes de l'échange des biens. Une deuxième conception vient du niveau général des prix issu de la théorie quantitative de la monnaie et exprimé par l'équation linéaire de Fisher qui met en relation la quantité de monnaie et le niveau général de prix.

Smith (1776) fait une distinction entre valeur d'usage et valeur d'échange. « Il faut observer que le mot valeur a deux significations différentes ; quelquefois il signifie l'utilité d'un objet particulier, et quelquefois il signifie la faculté que donne la possession de cet objet d'acheter d'autres marchandises. On peut appeler l'une Valeur en usage, et l'autre Valeur en échange. - Des choses qui ont la plus grande valeur en usage n'ont souvent que peu ou point de valeur en échange ; et au contraire, celles qui ont la plus grande valeur en échange n'ont souvent que peu

ou point de valeur en usage » (Smith, 1776, p. 33).

On retrouve cette distinction entre prix et valeur des biens chez Ricardo (1817) qui distingue le prix naturel et le prix courant. « Le prix courant du travail est le prix que reçoit réellement l'ouvrier, d'après les rapports de l'offre et la demande, le travail étant cher quand les bras sont rares, et à bon marché lorsqu'ils abondent. Quelque grande que puisse être la déviation du prix courant relativement au prix naturel du travail, il tend, ainsi que toutes les denrées, à s'en rapprocher. C'est lorsque le prix courant du travail s'élève au-dessus de son prix naturel que le sort de l'ouvrier est réellement prospère et heureux, qu'il peut se procurer en plus grande quantité tout ce qui test utile ou agréable à la vie, et par conséquent élever et maintenir une famille robuste et nombreuse" (Ricardo, 1817, p. 57).

Walras (1874) introduit la notion de "prix norme" (issu de la confrontation entre l'offre et la demande, impliquant les concepts de rareté et de préférences des agents) et du prix déterminé par l'échange (correspondant à la valeur d'échange de Smith). « Le fait de la valeur d'échange est donc un fait naturel, naturel dans son origine, dans son manifestation et sa manière d'être. Si le blé et si l'argent ont de la valeur c'est parce qu'ils sont rares, c'est-à-dire utiles et limités en quantité, deux circonstances naturelles. Et si le blé et si l'argent ont telle valeur l'un par rapport à l'autre, c'est qu'ils sont respectivement plus ou moins rares (...) Cela ne veut pas dire que nous n'ayons aucune action sur le prix. (...) Nous pouvons ou lui résister ou lui donner libre carrière selon qu'il nous convient, mais nous ne pouvons changer son caractère et ses lois. De même pour la valeur » [1].

Marshall (1890) propose une synthèse des théories classiques du prix et des travaux de Walras en stipulant que le prix d'un bien dépend de sa valeur travail et de sa valeur utilisée. « Les objets sont échangés les uns contre les autres en proportion du travail employé à les produire. Si l'offre relative à un objet quelconque devient insuffisante, cet objet peut, pendant un certain temps, se vendre pour un prix supérieur à son prix normal ; il peut être échangé contre des objets dont la production a exigé plus de travail qu'il n'en a exigé lui-même ; mais, alors, les gens abandonneront à la fois leur travail pour se mettre à le produire et, en très peu de temps, sa valeur tombera au-dessous du niveau normal » (Marshall, 1890, p. 18).

Cette distinction est également présente chez Marx qui distingue la valeur d'usage qualifiée de notion subjective et non quantifiable de la valeur d'échange correspondant au prix et donc ayant un caractère variable. La transformation des produits permet la création d'une nouvelle forme de valeur d'usage. « L'ancienne forme de leur valeur d'usage périt, mais uniquement pour se dissoudre dans une nouvelle forme de valeur d'usage. Or, en examinant le procès de

[1] *Éléments d'économie politique pure ou théorie de la richesse sociale*, 1874, p.29.

formation de la valeur, nous avons vu que, dans la mesure où une valeur d'usage est consommée, conformément à son but, pour la production d'une nouvelle valeur d'usage, le temps de travail nécessaire à la fabrication de la valeur d'usage consommée constitue une part du temps de travail nécessaire à la fabrication de la nouvelle valeur d'usage » (Marx, p. 225).

Ces définitions témoignent de l'évolution de la perception de la valeur, et ce faisant de ce que le prix est censé représenter. Le prix est en effet perçu comme reflétant la valeur accordée au contenu dans le bien ou le service auquel il est lié. Smith avait perçu dans la différence entre valeur d'usage et valeur d'échange, la dimension subjective de la valeur : la valeur d'un bien dépend de la perception (de l'usage) de chacun, alors que la valeur d'échange est déterminée par la rencontre des offreurs et des demandeurs.

Il est bien connu que les efforts successifs de Ricardo jusqu'à Walras et Marshall se sont concentrés sur la "source" de la valeur contenue dans la prix d'échange, avec une forte dimension normative chez Marx et Marshall. Pour eux, ce prix d'échange doit correspondre à la quantité de travail incorporée dans le bien, raisonnement en termes de valeur ajoutée qui sous-tend une notion de "juste rémunération" et donc de "juste prix". Walras, plus empirique (ou "légaliste" dans sa recherche d'une loi universelle) souligne le caractère relatif de la valeur, survenant du fait de la rareté relative ou absolue du bien et donc dépendant des circonstances de l'échange.

On voit donc ici se dessiner deux dimensions de la valeur qui donneront logiquement deux rôles potentiels pour un prix : il est soit le véhicule d'une information de type technique (contenu en facteur incorporé, "valeur ajoutée"), soit le véhicule d'une information conjoncturelle sur les conditions de l'échange qu'il régit (nombres d'offreurs et de demandeurs, volumes échangés). Quelle que soit la fonction, la nature du prix est la même : il est une information, elle même synthèse de l'ensemble de l'information disponible. Il apparait également clair que le type d'information véhiculé par le prix conditionnera le rôle de la transaction réalisée.

Le prix permet l'établissement d'un ordre spontané sur le marché grâce aux informations contenues dans le prix. « La fonction des prix et salaires est moins de rétribuer les individus pour ce qu'ils ont fait que de leur dire ce qu'ils devraient faire dans leur propre intérêt comme dans l'intérêt général (. . .) il sera souvent nécessaire que la rétribution ne corresponde pas au mérite qu'on peut leur reconnaître. » (Hayek, 1976, p. 86). Ainsi, « la coopération humaine » s'organise sur le marché qui est une représentation des relations humaines coordonnées.

La place du prix dans un cadre de modélisation néoclassique est ainsi bien définie. Le prix dans un cadre de marché apparaît lors d'une transaction entre offreur et demandeur du bien. Comme nous l'avons précisé auparavant, différents niveaux de prix donnent lieu à différents niveaux d'offre et de demande (les agents sont ici preneurs de prix). Il n'existe cependant qu'un

seul et unique point de croisement des fonctions d'offre et de demande à l'équilibre. Selon Edgeworth, « there is only one price in the market" (Edgeworth, 1897, p. 88).

Le prix est une variable observable qui sert à modéliser le comportement de l'agent représentatif rationnel et informé et à produire des échanges efficaces, optimaux. Les agents se trouvent dans le modèle de base dans un cadre de formation de prix respectant les hypothèses de la concurrence pure et parfaite : atomicité, homogénéité des produits, libre entrée et sortie sur le marché, libre circulation des facteurs de production, transparence de l'information. Les firmes disposent d'une technologie donnée permettant de réaliser un ensemble de production en tenant compte des prix des inputs et de l'output. La fonction du prix dans ce cadre est donc bien de synthétiser les conditions de l'échange.

Les échanges de concentré métallique impliquent deux types d'agents : les mineurs et les transformateurs. Ces agents effectuent des transactions entre eux, et cherchent à coordonner leur activité économique sans autorité supérieure centralisée. Les échanges de concentré doivent donc se faire à l'aide d'un prix dont le contenu informationnel garantirait que tous les paramètres requis pour une coordination efficace ont été prise en compte. Ce prix permet de réaliser les échanges correspondant à cet objectif. Il nous reste à déterminer dans quelle mesure un prix unique a un contenu informationnel suffisant ainsi qu'à juger s'il permet de pérenniser les échanges efficaces dans le temps, lorsque les conditions de marché changent.

I.1.2 Les fonctions d'un prix

Le besoin de coordination au sein de la filière, évoqué dans le chapitre 1, peut donc être partiellement satisfait par un prix de marché, pour ce qui relève des échanges : la seule condition est de disposer de suffisamment d'informations publiques. Qu'en-est-il de la gestion des coûts de chacun et de la répartition des profits au sein de la filière ? Peut on se passer complètement de la vision d'un prix reflétant le contenu en facteurs dans le cadre de la filière du zinc ?

Les limites physiques associées à un système de prix relatif

Dans le cadre du chapitre 1, la TC représentait une variable d'ajustement technique et de contrôle du pouvoir de marché dans une logique de coordination de filière. La coordination se basait sur l'équilibre technique de la filière caractérisé par une négociation des moyens de production mobilisés associés à un niveau de TC donné. Sur cette base, un compromis comprenant le pouvoir de marché se greffait. On peut donc de façon très sommaire résumer le contenu informationnel de la TC dans le chapitre 1 comme suit :

TC = Information technique sur les facteurs + Information sur le pouvoir de marché + Autres paramètres (stocks, etc.)

Cette vision repose sur deux obstacles classiques à la mise en place d'un cadre de concurrence pure et parfaite, il s'agit de la prise en compte des coûts d'information ainsi que du stockage. Coase (1937) fait le premier référence aux coûts induits par l'accès au marché (coûts d'information). La théorie des coûts de transaction souligne l'apparition d'autres mécanismes de coordination tels que la coordination hiérarchique qui limite les coûts de transaction, mais qui ne se dessaisit pas de la notion de prix. La notion du prix n'est donc pas la seule à être mobilisée pour une coordination par le marché et pour la mise en place d'échanges dans une économie du marché. Un cadre institutionnel et juridique complet est requis pour définir et encadrer les coûts de transactions (North, 1990, Williamson, 1985, 1999). Il est important de noter que la présence des coûts de transaction n'empêche pas nécessairement d'utiliser des prix pour la coordination, surtout si des contrats relativement complets sont signés (Grossman et Hart, 1986). Alors que les coûts liés à la rédaction des contrats correspondent aux coûts *ex ante* (Williamson, 1999), les coûts engendrés par l'incomplétude des contrats sont considérés comme *ex post* et ils s'ajoutent aux coûts des actifs spécifiques. Nous ferons donc l'hypothèse, étayée par le chapitre 1, que le contrat du concentré correspond à un contrat complet dans le sens de Hart et Moore (1990) du fait de l'absence des imperfections des informations dans les conditions de la CPP.

En absence de stock, l'équilibre du marché est obtenu en déterminant les niveaux de l'offre et de la demande correspondant à un niveau de prix donné. Comme nous l'avons vu lors de la présentation de la filière, la gestion des stocks est un des moteurs de la coordination au sein de la filière permettant d'éviter les ruptures d'approvisionnement Pindyck (2001). La notion de *convenience yield* introduite par Kaldor (1939) s'applique aux échanges du concentré. La possession du stock permettant de satisfaire la demande immédiatement, sans attendre à produire le bien, procure un bénéfice supplémentaire à celui qui détient le stock (Working, 1933, Brennan, 1958). La transformation de la TC en variable de prix pur demande donc un traitement pertinent de la question des stocks.

Le prix comme vecteur exhaustif d'information : une hypothèse pertinente pour la filière ?

Selon Hayek (1980), le prix permet une rétribution des individus incitant à agir dans le sens de l'intérêt général. On retrouve ici l'idée de la "main invisible" présentée depuis les écrit de Smith (1776). A priori, il n'est pas nécessaire de se soucier des comportements en amont et en aval de l'échange, car le prix de l'échange guide chacun vers une coordination parfaite.

Friedman et Friedman (1979) accordent eux un rôle central au système de prix dans l'économie. "The price system is the mechanism that performs this task without central direction, without requiring people to speak to one another or to like one another". Dans « Free to chose » (1979) il identifie trois fonctions du système de prix comprenant la transmission de l'information, l'incitation à l'efficience et la distribution du revenu [2].

Hayek va plus loin encore, en proclamant la centralité du processus économique dans les mécanismes juridiques et institutionnels. « Les économistes (...) ont probablement contribué, inconsciemment, à la transformation de tout l'ordre social autant que ne l'ont fait les juristes. (...) Cela devient évident quand nous examinons la raison régulièrement invoquée par les juristes, pour les grands changements qu'a subi le caractère du droit pendant les cent dernières années (...) nous trouvons les nécessités économiques alléguées comme les raisons de ce changement» (Hayek, 1980, p. 81).

La proposition du modèle néoclassique pour le marché est donc la suivante : utiliser un système de prix relatifs composé de prix de référence, qui contiendront toute l'information disponible et rendront caduque tout cadre institutionnel supplémentaire. Pour reprendre notre formalisation :

$$\text{TC} = \text{Information technique sur les facteurs} + \text{Information sur les anticipations et le cadre institutionnel} + \text{autres (stocks, etc.)}$$

Le modèle néoclassique permet de minimiser les pertes liées au second terme et de faire disparaitre le dernier terme en régime normal.

Le contenu informationnel des prix : production courante et anticipations

Comme nous l'avons déjà largement indiqué, le prix fournit une information synthétique quant à la disponibilité d'un bien donné et aux déséquilibres existants entre l'offre et la demande. Tous les agents se comportent d'une manière prévisible en faisant les meilleurs choix possibles dans le sens de von Mises (1949). Le prix joue alors un rôle de signal, qui doit être pris en compte dans les plans de production (Spence, 1973, Grinblatt et Hwang, 1989). L'offre est une fonction croissante du prix, la demande est une fonction décroissante : en situation de pénurie le prix augmente et cette augmentation permet l'ajustement de l'offre et de la demande afin d'atteindre un nouvel équilibre.

[2] "Prices perform three functions in organizing economic activity : first, they transmit information ; second, they provide an incentive to adopt those methods of production that are least costly and thereby use available resources for the most highly valued purposes ; third, they determine who gets how much of the product—the distribution of income. These three functions are closely interrelated" (Friedman et Friedman, 1979).

Le prix contient donc les signaux nécessaires aux ajustements de la production courante de période à période. Mais il intègre également dans la vision néoclassique des éléments sur les cycles de production à venir et sur le cycle de vie du produit. Dans le cadre d'une hypothèse de rationalité adaptative (anticipations adaptatives dans le sens de Friedman (1968)), l'existence d'un prix de marché est compatible avec les stocks observés au sein de la filière de zinc : le volume de ces stocks peut même varier en proportion des produits, dans la mesure ou des erreurs de jugement de court terme peuvent survenir.

Si on se place dans un contexte d'anticipations rationnelles (Lucas, 1988), les agents ne peuvent commettre d'erreurs systématiques et compte tenu des informations contenus dans le prix, les stocks doivent être réduits au minimum. Dans la cadre de la filière du zinc, il nous faut donc faire l'hypothèse d'une visibilité à long terme des acteurs sur la demande du marché et évaluer si le prix à permis à chacun d'obtenir cette visibilité (Williams et Wright, 1991).

Les effets dynamiques d'un système de prix relatif : le progrès technique

L'allocation efficiente des ressources à l'aide d'un prix du marché est conditionnée par la disponibilité parfaite de l'information. Les agents doivent pouvoir en disposer gratuitement afin de procéder aux choix optimaux. Les firmes sont intéressées par cette transparence des informations et elles procèdent aux ajustements en réponse aux variations du prix. En revanche, l'utilisation d'une variable négociée ne requiert pas le respect de cette hypothèse de l'information parfaite. L'information étant majoritairement privée, les firmes procèdent aux ajustements en respect avec les engagements des négociations.

L'hypothèse de l'information parfaite suppose également une uniformité des technologies utilisées par les firmes, compte tenu de la propagation immédiate de toute amélioration du processus de production. Par ailleurs, le prix reflète l'évolution de la structure du marché et les évolutions liées au changement du processus de production (progrès technique, structure des coûts, etc.). Le progrès technique est la conséquence des incitations faites par le prix, l'investissement des firmes dans l'amélioration du processus de production s'apparente à un coût fixe et il permet une réduction du niveau de prix (voir (Kennedy et Thirlwall, 1972)).

La technologie (le progrès technique) a une place à part dans la modélisation de l'équilibre car elle représente une condition de la stabilité de l'équilibre général dans le sens d'Arrow et Debreu (1954) . Les vertus de la CPP sont nuancées par les hypothèses sur la technologie (absence de rendements croissants et coûts fixes sauf pour les grandes firmes qui supportent les coûts fixes). Le rôle du progrès technique est également important chez Solow (1956) selon qui la croissance provient du progrès technique, variable exogène au modèle que les firmes ne maîtrisent pas. Considérant la lente vitesse d'amélioration des techniques de production de

l'industrie de zinc, on va également considérer dans notre modèle le progrès technique comme exogène.

La question des réserves et du taux d'extraction découle naturellement des contraintes technologiques des firmes. Selon Pindyck (1978), les réserves potentielles sont illimitées et les firmes doivent établir un niveau d'exploration et de production simultanément afin de garantir un niveau optimal des réserves. Dasgupta et Heal (1979) proposent l'illustration des conclusions de Solow sur le taux d'extraction où, sous condition du taux d'intérêt positif, la firme doit procéder d'abord à l'exploitation des gisements *low-cost* et passer progressivement aux gisements *high-cost*. Ces deux conclusions supportent l'hypothèse que le prix de marché envoie les incitations pour les investissements de productivité dans la filière et garantit, sous ces condition, l'optimalité de la production. Néanmoins, le fait de disposer des ressources naturelles ne garantit pas leur utilisation efficace par les pays. Il s'agit en effet, de la "malédition des ressources naturelles" (ang. *Resource Curse*), détaillée dans les travaux de Davis et Tilton (2005, 2008).

L'information transmise par le prix incite les agents économiques à modifier leur comportement, cette incitation correspond à la seconde fonction du système de prix relatifs. Les offreurs basent leurs prix de vente sur les coûts de productions des biens offerts. Lorsque le prix d'un bien est trop élevé et que ce bien ne peut pas être vendu sur le marché, le prix relatif de ce bien fournit une incitation au producteur d'améliorer le procédé de production en vue de devenir plus compétitif. Une firme qui veut baisser le prix devrait passer par une étape nécessaire de modification de sa structure des coûts en rendant le processus de production plus efficace.

En absence de confrontation directe entre les mineurs et les transformateurs, le niveau de prix d'équilibre détermine les quantités offertes et demandées. Nous pouvons donc décrire l'activité de la filière en tant que marché organisé doté d'un prix et susceptible d'atteindre l'équilibre. L'ajustement des capacités de production sur le long terme pourrait donc se faire à l'aide d'une variable de prix. Cet ajustement est dynamique, caractérisé par un retard entre l'établissement du prix et l'ajustement quantitatif.

La demande d'un bien est étroitement liée à la notion de l'utilité que le bien procure à l'agent économique, c'est-à-dire par la satisfaction obtenue par la consommation de ce bien. Lorsque le consommateur n'est pas en mesure de se procurer le bien en raison d'un prix trop élevé, il pourra acheter un bien de substituion. De cette manière, le prix contient une incitation à produire au moindre coût (efficacité) et à limiter la consommation (seuls les consommateurs les plus désireux, dont la propension marginale à consommer est la plus élevée, obtiennent les biens).

L'information contenue dans le prix est utile seulement à ceux qui recherchent cette information, elle est facilement disponible pour tout le monde. Le prix relatif reflète l'information sur les variables macroéconomiques «immédiates» (offres et demande) et des variables «fondamentales» (macro- et micro-économiques et variables de structure) (Barrière).

L'allocation des ressources

L'efficacité de l'échange traduit la distribution des allocations entre les agents ayant une disposition marginale à payer plus forte et les producteurs qui ont un coût marginal de production le plus faible. Les firmes ne réalisent pas de profits à long terme (l'obtention du profit est possible à court terme, mais cette situation n'est pas durable en raison de l'entrée de nouvelles firmes sur le marché).

La fonction de la répartition des revenus se traduit par la répartition primaire des facteurs de production intervenant dans le processus de production. Traditionnellement on tient compte de la répartition du revenu entre le facteur travail, capital et terre dans le processus de production. Ainsi, une variation du niveau de prix va entrainer un déplacement sur la frontière des possibilités de production et par conséquent, le déplacement de la demande en facteurs de production. La modification de la demande va avoir comme conséquence la modification de la répartition des revenus entre les facteurs de production et de l'utilisation des ressources. En fonction de la nature du bien et des besoins du processus de production, la répartition des facteurs de production sera différente. Naturellement, un changement du prix du bien intensif en un seul facteur modifiera la répartition du revenu de façon marquée en faveur de ce facteur. L'utilisation des ressources et la distribution des revenus sont ainsi déterminées par le marché. De plus, cette distribution des revenus n'est possible qu'en situation de liberté économique et, par conséquent, de liberté politique.

Les trois fonctions du système relatif des prix que nous venons de détailler sont interconnectées. La nécessité de définir un prix apparaît au moment où les agents sur le marché souhaitent procéder à un échange et c'est bien le prix qui permet une coordination marchande décentralisée. Le fonctionnement d'un système de prix relatif est caractérisé par l'optimalité et l'efficacité.

Refléter la contribution de chacun : optimalité au sein de la filière

Une démonstration formelle de l'efficacité du système de marché correspond à une situation Pareto-optimale où, sous certaines conditions, il n'est pas possible d'augmenter les niveaux d'utilité de tous les agents. Ce système garantit le bon emploi de ressources et se traduit par la baisse des coûts, l'innovation, la réduction de l'incertitude, la maîtrise des risques et l'allocation

des ressources rares à des besoins illimités. Arrow et Debreu (1954) associent à cette conclusion un certain nombre d'hypothèses institutionnelles et de comportement des agents.

A l'équilibre de la CPP, le surplus collectif est maximal : le surplus des producteurs est nul, la totalité du surplus revient aux consommateurs. On assiste à une situation stable et non conflictuelle où les consommateurs désireux obtiennent les biens de la part des firmes les plus efficaces. Les firmes moins efficaces et les consommateurs moins désireux disparaissent du marché. Cette organisation du marché est donc préférable à d'autres formes d'organisation en raison de son caractère socialement optimal (Blaug, 2001).

A la différence du fonctionnement de la filière où les contraintes de flux justifient l'existence des firmes peu efficaces, l'utilisation du cadre de la CPP suppose l'efficacité du processus de la production. Globalement, il s'agit de définir comment on produit un bien, en quelle quantité on le produit et qui consomme ce bien. La technologie la plus efficace, au seuil de rentabilité le plus bas, est donc choisie par la totalité des entreprises (égalité du coût marginal au coût moyen). Ceci a pour conséquence la limitation de la consommation des ressources et la mise en place des incitations pour l'utilisation efficace de ceux-ci.

L'efficacité de l'allocation des ressources au sens de Pareto (1935) pourrait être appréciée à travers trois critères : efficacité de l'échange, efficacité de la production et efficacité de la composition de la production.

L'efficacité de la production englobe le postulat qu'il n'est pas possible d'accroître la production d'un bien sans diminuer celle d'un autre. Ainsi, les firmes choisissent les inputs qui minimisent les coûts et maximisent le profit. L'efficacité de l'échange traduit la distribution des allocations entre les agents ayant une disposition marginale à payer plus forte et les producteurs qui ont un coût marginal de production le plus faible. L'efficacité dans la composition de la production reflète les préférences des consommateurs, ce qui permet de produire uniquement les biens qui pourront être vendus et consommés.

En termes de conséquences sur la structure de la filière du zinc, on suppose qu'à long terme, en raison de la libre entrée/sortie en CPP, le nombre d'entreprises doit être plus important. Si on se place dans le cadre des marchés contestables (Baumol *et al.*, 1982), le nombre de firmes de la filière peut rester inchangé, mais leur fonctionnement se rapprocherait de la CPP en raison de la menace de la concurrence potentielle.

Ce cadre de modélisation néoclassique s'ancre dans une conception de prix permettant une organisation efficace du marché. La convergence vers l'équilibre et la satisfaction à cet équilibre des allocations optimales sont les deux caractéristiques des marchés compétitifs. En modélisant

la TC en tant que prix dans les conditions de la CPP, nous cherchons à vérifier analytiquement et empiriquement l'existence de la convergence vers l'équilibre et la mise en place de l'allocation optimale des ressources.

Ceci conclut notre examen de la revendication néoclassique concernant le rôle et les fonctions d'un prix de marché. L'identification des fonctions d'un prix après la détermination du rôle de ce prix dans un système de prix relatifs forment le socle de notre raisonnement théorique. Nous avons démontré comment l'hypothèse 2 s'inscrit dans le cadre des hypothèses du modèle néoclassique, en insistant sur les points critiques pour la filière du zinc : la coordination des échanges, la gestion des stocks et le cadre contractuel de la filière.

La revendication néoclassique nous permet de proposer un corollaire à l'hypothèse 2 :

Corrolaire I.0.1. *Si la TC est un prix dont le rôle est de guider les échanges, alors son utilisation garantit la mise en place d'une gestion optimale (au sens de Pareto) de la filière.*

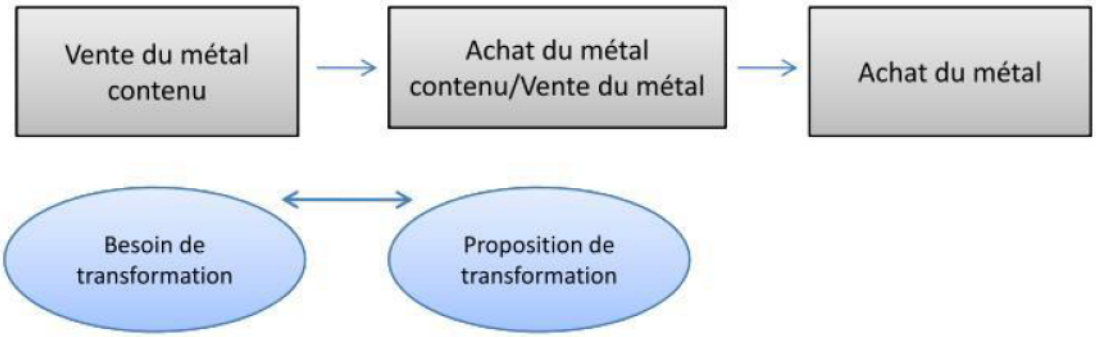
En ceci, les implications de l'hypothèse 2 sont clairement différentes de celles de l'hypothèse 1. Il est possible de tester l'hypothèse 2 en constatant analytiquement si les mécanismes de la TC permettent d'atteindre une situation Pareto-Optimale. Nous allons maintenant adapter ce cadre théorique à la filière du zinc, en montrant comment la TC est passé d'un simple indicateur du coût des facteurs à une variable de prix proche du cadre néoclassique. Cette étape achevée nous pourront formaliser notre cadre d'analyse et tester analytiquement l'hypothèse 2.

I.2 Quel prix pour le marché du concentré ?

Après avoir exposé dans la partie précédente les postulats théoriques sur la place du prix dans un système de prix relatifs, nous pouvons passer à la retranscription de ce cadre sur les transactions de concentré de zinc.

Nous commençons par la transcription de la TC, partant de son rôle historique en tant que prix renseignant sur l'équilibre technique. La TC avait alors un rôle plus proche d'un prix illustrant la contribution des facteurs que d'un prix basé sur l'information nécessaire à la réalisation des échanges. Les raisons de son éloignement progressif de ce rôle sont étudiées, ce qui nous renseigne sur le contenu informationnel de la TC dans son rôle actuel.

Graphique 2.1: Vision historique de la TC et des échanges du concentré



Source : Auteur

I.2.1 Le rôle historique de la TC : prix de transformation et définition des programmes de production

Definition d'un prix de transformation

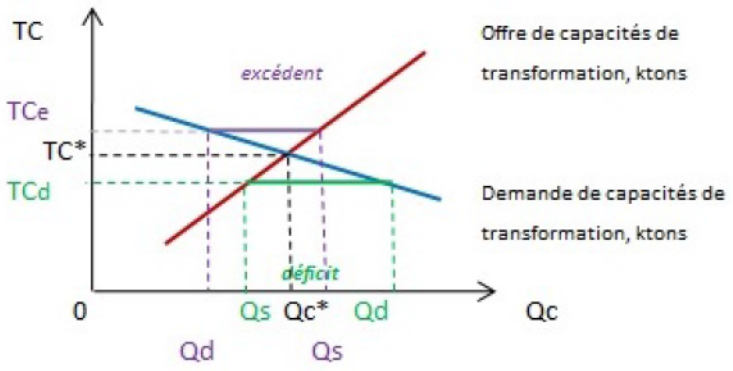
La TC a été introduite dans les échanges du concentré afin de rémunérer les transformateurs pour l'opération de transformation du concentré en métal. Ce raisonnement se tient encore aujourd'hui si l'on considère que le rôle du transformateur se résume uniquement à la transformation (on exclut alors l'exposition du transformateur au risque du prix du métal lié à l'existence de 'free metal'[3]). L'introduction de la TC a été faite par un groupe de producteurs européens de zinc cherchant à organiser la coordination des flux de la filière en assurant un revenu stable aux transformateurs (Plachy, 1992).

Le schéma 2.1 présente la vision historique de la TC. Le besoin de transformation du concentré émane des mineurs, les transformateurs sont eux susceptibles de proposer une solution de transformation. La TC, correspond au coût de la transformation et elle rémunère le transformateur pour cette opération. Ainsi, lors de la transaction sur le concentré, le mineur et le transformateur sont offreurs et demandeurs en même temps : le mineur est l'offreur du concentré en même temps que demandeur des capacité de transformation, inversement le transformateur est demandeur du concentré tout en étant offreur des capacité de transformation[4].

[3]Ce revenu complémentaire peut être considéré comme un « sur-profit » dans le cas où la TC suffit à couvrir les coûts de la transformation. A priori, ceci n'est plus le cas actuellement, et les revenus complémentaires en 'free metal' compensent le faible niveau de la TC, qui ne couvre plus le coût de la transformation.

[4]Il y a donc deux façon de voir le marché, comme pour le marché du travail, qui peut être le marché du travail ou le marché de l'emploi.

Graphique 2.2: Déséquilibre des capacités de transformation



Source : Auteur

Il nous semble plus pertinent, dans cette perspective historique, de considérer que le marché s'organise autour des échanges du service (la transformation) plutôt que du bien (le concentré). Nous pouvons représenter graphiquement l'offre et la demande de capacités de transformation. L'axe des ordonnées représente la TC qui fait ici office de prix. L'offre et la demande de capacités de transformation sont définies en fonction de la valeur de la TC. La demande de capacité de transformation est une fonction négative de la TC, l'offre des capacités de transformation est une fonction positive de la TC. La capacité de transformation est estimée en nombre de tonnes de concentré transformé ou de métal produit.

Ajustements quantitatifs par le prix de transformation

L'offre et la demande de transformation vont dépendre du niveau de la TC (graphique 2.2). A l'équilibre, la quantité du concentré Qc^* est vendue au prix TC^*. Cette TC d'équilibre correspond à une situation où les capacités de transformation pour la TC^* sont égales aux capacités de transformation que les mineurs seront disposés à demander. Cette valeur existe et elle est unique. L'excédent de capacités de transformation correspond à une situation où une partie des capacités de transformation reste inoccupée, il n'y a pas assez de concentré, l'offre des capacités est supérieure à la demande.

A ce niveau de la TC les transformateurs ont trop de capacités de transformation, alors que les mineurs ne sont pas intéressés par l'accroissement de la quantité du concentré produite. Afin de résorber l'excédent sur le marché, la TC va baisser et ce jusqu'à une valeur d'équilibre. Cette nouvelle TC, plus faible, va impliquer le déplacement le long de la courbe de l'offre et de la demande (réduction de l'offre et augmentation de la demande) afin d'atteindre l'équilibre.

L'ajustement inverse se produit lorsque le marché est en situation du déficit des capacités de transformation. Alors, les transformateurs proposent des capacités de production insuffisantes compte tenu du niveau de la TC qui leur semble bas. Ce niveau de TC est également pénalisant pour les mineurs, car ils ne peuvent pas vendre la totalité du concentré sur le marché où les capacités de transformation sont insuffisantes. Par conséquent, la TC augmente, ce qui permet aux transformateurs d'augmenter les capacités de transformation, alors que les mineurs vont réduire leur demande de capacités de concentration.

L'utilisation de la TC en tant que prix de l'opération de transformation permet des ajustements des capacités de transformation en cas d'excédent ou de déficit du concentré. Les capacités de transformation et le besoin de transformation peuvent subir des variations liées au changement de la demande de bien final (métal), à l'amélioration de la qualité du concentré, à la mauvaise estimation des réserves minières, etc. Nous verrons plus bas le rôle exact des transformateurs et des mineurs dans la transmission des chocs depuis le marché du métal.

A long terme, un changement de la TC permet une modification du nombre des firmes sur le marché (entrée ou sortie des firmes), ce qui modifie les fonctions d'offre et de demande se traduisant par le déplacement des courbes. Dans de nombreux cas de figure, les variations des quantités offertes ou demandées peuvent être le résultat d'événements exogènes, positifs ou négatifs affectant la production. Un changement du cadre législatif (les mesures protectionnistes, la limitation de la production), un changement de régime politique dans les pays de transformation, des événements de force majeure (tels que les tremblements de terre, les éruptions volcaniques, les incendies, etc.) ont tous un impact durable sur les quantités disponibles.

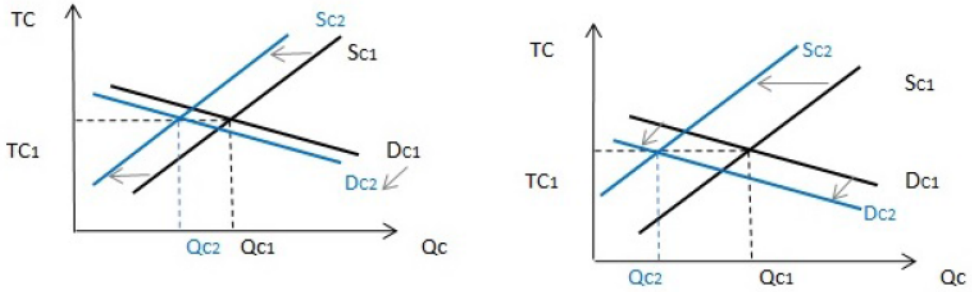
Nous détaillons ci-dessous deux exemples de chocs quantitatifs : choc d'offre (ex. modification du cadre législatif de l'industrie de transformation) et choc de demande (ex. grève du personne, erreur d'estimation de la richesse de la mine). A l'équilibre, l'offre des capacités de transformation S_{C1} est égale à la demande de transformation D_{C1} pour lesquelles les quantités Q_{C1} et le prix TC_1 sont connues. Un choc d'offre (graphique 2.3a) entraine une réduction des capacités de transformation S_{C2} qui devient Q_{C2}. Les mineurs vont alors réduire la production du concentré pour retrouver le niveau Q_{C2} (déplacement de la courbe de la demande de capacités de transformation).

De la même manière, un choc qui affecterait la production minière (Figure 2.3b) va entrainer à long terme une réduction du concentré disponible pour la transformation et donc une baisse de la demande de transformation (D_{C1} qui devient D_{C2}).

Ce exemple montre que la TC historique basée sur les coûts de production (et donc la valeur ajoutée des transformateur) permettait d'assurer une partie des fonctions définies plus

Graphique 2.3: Ajustement des capacités de transformation

(a) Choc conjoncturel d'offre (b) Choc conjoncturel de demande



Source : Auteur

haut. Cette TC donnait une incitation directe aux transformateurs de réaliser la production au moindre coût et d'être plus efficaces. Selon les évolution de la TC, chaque type de firmes pouvait se trouver dans une situation d'excédent ou de déficit, auquel cas une correction se déclenchait automatiquement via la TC.

Néanmoins, la capacité de cette TC historique à capturer toute l'information disponible n'est pas établie. De même, si elle incite les agents à procéder à des échanges efficaces, elle ne donne pas d'information particulière sur les évolutions à long terme de la filière : trop d'information reste détenue à titre privé par les mineurs et les transformateurs. Enfin, avec une TC calibrée seulement pour fournir une capacité de transformation, il ne peut pas non plus être établi que le marché du concentré recevra correctement les signaux transmis depuis le marché du métal, condition nécessaire d'un équilibre de la filière.

I.2.2 La TC de base aujourd'hui : vecteur d'information pour un équilibre partiel

Modélisation de l'information dans une perspective d'équilibre partiel

En 2008, le surplus de concentré et le prix élevé du zinc ont permis aux transformateurs de négocier une TC de 300$/t. Dans le courant de l'année, le prix de zinc a baissé d'environ 50% avec la baisse de la consommation d'acier galvanisé. En réponse à la baisse de la demande finale, les mineurs ont réduit leur production d'environ 10% en base annuelle, s'assurant ainsi un avantage pour la négociation de la TC. La TC est fixée à 195$/t l'année d'après Mining Journal (25 janvier 2002).

Cet exemple illustre les limites de la TC historique dont les fluctuations pèsent sur le fonctionnement de la filière. La TC s'est peu à peu trouvée en décalage par rapport au coût de transformation du concentré, le niveau de la TC étant inférieur à celui-ci. Le deuxième changement structurel majeur a été l'indexation de la TC sur le prix du métal, variable exogène aux échanges du concentré.

Les raisons de cette divergence entre le coût de la transformation et le niveau de la TC viennent de l'amélioration du taux de recouvrement par les transformateurs. Le taux de recouvrement a passé progressivement de 85% à 99% pour les transformateurs européens, alors que c'est le taux à 85% qui est utilisé dans la formule de valorisation du concentré. Le complément de revenu obtenu par les transformateurs grâce à 'free metal' a été à l'origine de l'évolution du rôle de TC. L'existence de ce revenu complémentaire a permis aux mineurs de réclamer une TC plus basse pour aboutir à ce que le revenu de la TC seul ne couvre plus les coûts de transformation supportés par le transformateur. Le lien entre le niveau de la TC et sa fonction historique a donc progressivement disparu.

Le dernier élément de complexité vient de la formule de valorisation du concentré, basée sur le calcul réalisé à chaque transaction selon les mêmes règles. Mais la valeur du concentré reste inconnue jusqu'au moment de l'exécution du contrat, du fait des nombreux éléments qui rentrent dans ce calcul (équation 1.2). Parmi ces éléments on trouve la TC réalisée (contenant donc la TC de base), les informations techniques (contenu en métal, déduction unitaire) et les produits annexes (autres métaux et composants)[5].

Notre travail d'analyse vise à identifier le partage de l'information entre la TC de base, le prix du métal (directement ou via la TC réalisée) et la valorisation du concentré afin de déterminer quelle variable correspond à un véritable prix du marché du concentré dans le contexte actuel. Pour nous guider, nous nous tournons vers la littérature existante.

Modélisations des prix dans la littérature

Le concentré métallique ainsi que les interactions entre les offreurs et les demandeurs de concentré n'ont pas fait l'objet d'études théoriques étendues. La plupart des informations sur les relations entre les firmes est présentée par les analystes du marché sur la base d'exemples concrets. Le caractère novateur de notre travail est justifié encore une fois par la quasi-absence de références bibliographiques.

[5] La TC réalisée correspond à la TC de base à laquelle on ajoute les éléments liés aux variations du prix du zinc : $TC_{spot} = TC_{base} + (PZn - PZnB) * Scale$. Avec PZn le prix du zinc journalier et $PZnB$ le prix du zinc de base associé à la TC de base. Voir chapitre 1.

Les métaux non ferreux font partie des matières premières régulièrement évoquées dans la littérature économique. Nous ne cherchons pas à fournir une revue complète de l'état de la recherche sur les matières premières. Ce travail a été brillamment réalisé par Labys (2005) ou bien par Watkins et Mcaleer (2004). Labys (2005) propose une revue extensive des travaux consacrés aux matières premières. L'auteur constate un essor considérable des problématiques liées aux matières premières qui se traduit par une diversification des produits considérés et par une utilisation de plus en plus poussée des techniques statistiques récentes. Watkins et Mcaleer (2004) propose une revue des articles modélisant le prix des matières premières parus entre 1929 et 2002 et souligne l'usage des techniques statistiques avancés dans l'analyse des prix. Néanmoins, les travaux de ces auteurs confirment l'absence d'études sur les concentrés métalliques et les opérations en amont de la filière de production du métal.

Il existe néanmoins un certain nombre d'études qui concernent indirectement notre problématique. Nous présentons ici les contributions qui nourrissent notre réflexion sur la définition d'un prix de marché pour le concentré. Nous reprenons à notre compte la distinction générale de Labys (2005) sur les deux grandes catégories des travaux sur les matières premières, ciblé sur les marchés de métaux. Les travaux se partagent entre ceux visant à construire un modèle théorique de prix et ceux visant à explorer les processus statistique des séries de prix. Nous présentons le premier groupe de travaux ici, le second sera détaillé en section III.

Les facteurs de la demande dans le cadre de l'équilibre partiel sont les premiers à être considérés. Fisher *et al.* (1972) utilise le cadre de l'équilibre partiel pour modéliser le prix sur le marché du cuivre. Le marché du cuivre est également étudié par Ghosh *et al.* (1987) qui développe un modèle du marché mondial du cuivre afin d'étudier les facteurs explicatifs du prix du cuivre. Partant des exemples du fonctionnement d'un marché donné, les travaux de Fisher *et al.* (1972) et Ghosh *et al.* (1987) posent les bases théoriques de la modélisation d'un prix sur le marchés des matières premières. La prise en compte des facteurs macroéconomiques (Reinhart, 1994, Reinhart et Borensztein, 1994, Verleger, 1982) et des facteurs spécifiques du marché (Frankel et Rose, 2010) constituent un approfondissement naturel de la compréhension des variations du prix.

Rosenau-Tornow *et al.* (2009) reprennent la distinction de Hewitt et Wall (2000) de quatre groupes des facteurs explicatifs des prix des matières premières et élargissent sensiblement la liste des variables explicatives utilisées actuellement pour la modélisation de l'évolution des prix des matières premières. Il s'agit donc de la prise en compte de la structure du marché en tant que facteur influençant, voire expliquant le niveau du prix. L'intérêt envers la structure de la filière est porté en premier lieu par les études sur le pétrole et ses produits dérivés (Bruneau et Nicolai, 1991, Rao, 2008, Baffes, 2009). L'interdépendance des firmes de la filière est modélisée à l'aide

de l'équilibre partiel simultané sur plusieurs marchés. Bruneau et Nicolai (1991) proposent une modélisation simultanée des prix sur deux marchés : marché du pétrole et marché des produits dérivés du pétrole. Rao (2008) conclut sur l'existence d'une relation de causalité du prix de pétrole sur le marché des produits dérivés.

Au fil du temps les études sur une large palette des facteurs affectant le prix de plusieurs matières premières (Reinhart et Borensztein, 1994, Reinhart, 1994) cèdent la place aux études plus étroites portant sur les problématiques de stockage (Deaton et Laroque, 1992, Pindyck, 1994, 2001). L'angle commun à ces travaux est la recherche de réponses à la baisse structurelle des prix des matières premières ainsi qu'à la forte volatilité des prix, via l'étude de facteurs explicatifs des dynamiques des prix. La prise en compte des cycles économiques (Cuddington et Jerrett, 2008, 2011) et l'influence mutuelle des prix des matières premières (Baffes, 2009) complètent les études précédentes. L'existence des cycles de prix longs, pouvant durer plusieurs décennies, est explorée par Cuddington et Jerrett (2008), ces cycles sont en lien avec cycles économiques Cuddington et Jerrett (2011).

Les auteurs concluent que le cycle des prix de chaque métal est lié à celui des autres matières premières sans pour autant reproduire la même trajectoire (Jerrett et Cuddington, 2008). Baffes (2009) démontre un lien fort entre le prix de l'énergie et les prix des matières premières formant quatre groupes en fonction de la nature de ce lien. Ces modèles permettent d'élaborer un cadre d'étude de prix des matières premières dans leur globalité. Ceci constitue également leur principal défaut, celui d'être trop généralistes. Cashin *et al.* (2002) démontrent la nécessité de chercher des variables spécifiques pour améliorer le pouvoir explicatif des modèles existants.

Notre réflexion sur la manière à appréhender la TC en tant que variable de prix est issue en partie des contributions mentionnés ci-dessus. Le prix fait objet des travaux à forte dominante théorique, ce n'est que dans un second que viennent les travaux empiriques identifiant les facteurs explicatifs du prix, la structure du marché ainsi que les liens entre les différents marchés.

Toutes ces études ont un point commun, celui de disposer d'un cadre d'analyse solide sur la base duquel sont proposées des modélisations. Les applications empiriques utilisent cette base théorique ; elle est également enrichie par la prise en compte de la dimension inter-connectée de la filière. Étudier la TC en tant que prix nécessite l'élaboration d'un cadre théorique. De ce fait, dans un souci de cohérence, nous proposons d'abord une modélisation théorique du marché du concentré. Sur cette base, nous proposons une modélisation du prix sur le marché du concentré.

Les micro-fondations de la TC

La littérature n'est malheureusement pas particulièrement éclairante pour notre modélisation. Nous reprenons néanmoins le principe de Bruneau et Nicolai (1991) sur la détermination d'un équilibre simultané. Quant à choisir entre la TC de base, la TC réalisée et la valorisation du concentré, nous utilisons le critère du contenu informationnel pour décider de la variable la mieux à même de représenter le prix du concentré.

La TC de base est perçue par les intervenants en tant que variable déterminant les décisions de production des mineurs et des transformateurs. Cette place est conforme au rôle du prix des "facteurs" que remplissait la TC historique, dont la TC de base est la directe héritière. Il semble donc logique d'attribuer à la TC de base le rôle de prix des échanges du concentré dans la mesure où elle est la valeur à laquelle on se réfère pour les plans de production (voir le graphique 3.7 proposé dans la section I).

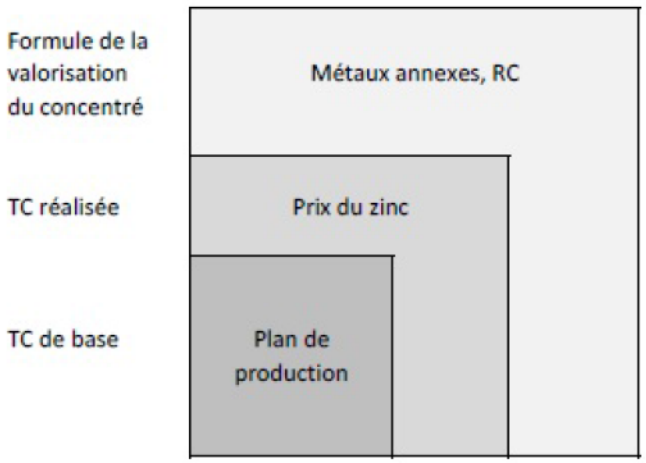
Notre modélisation doit tenir compte de la différence entre la TC et la valorisation du concentré. Cette différence avait peu d'importance dans le cadre de l'hypothèse 1, du fait des liens entre ces deux variables et du caractère exogène du prix du métal. Dans le cadre de l'hypothèse 2, le marché du concentré doit atteindre un équilibre compatible avec l'équilibre prévalent sur le marché du métal, pour un équilibre de filière. L'information véhiculée par le prix du métal est nécessaire à la formulation des anticipations nécessaires. Il nous faut donc modéliser la nature du lien, *en termes de contenu informationnel*, entre TC et formule de valorisation du concentré.

Nous rappelons que la valorisation du concentré est issue du calcul réalisé à chaque transaction selon les mêmes règles. La valeur du concentré reste donc inconnue jusqu'au moment de l'exécution du contrat, mais dépend de l'ensemble des prix des métaux contenus et des paramètres de liés à la production du zinc métal. A ce titre, la valorisation du concentré regroupe toute l'information disponible sur le marché. Or dans la mesure où nous cherchons un prix pour le marché du concentré de zinc seul, la valorisation du concentré, telle que définie par la formule 1.2 (chapitre 1) pose problème :

$$V = TC_{base} + E_{TCspot} + M_i \tag{2.1}$$

D'un point de vue informationnel, la formule de valorisation du concentré se décompose entre l'information sur les plan de production contenu dans la TC de base, l'information fournie par le prix du métal et l'application des coefficients de variation E_{TCspot} et l'information fournie par les autres facteurs, notamment le contenu en métaux M_i. Le graphique 2.4 présente cette décomposition.

Graphique 2.4: Décomposition de la formule du concentré



Source : Auteur

Nous ne pouvons donc pas considérer cette formulation de la valorisation du concentré comme le *prix de marché* du concentré. La quantité transformée du concentré ne dépend pas du niveau de la valorisation, mais de la TC. Hypothétiquement, même si la valorisation du concentré est égale à zéro, les transformateurs seront toujours disposés à proposer des capacités de transformation à condition d'être rémunérés grâce à la TC. Cette décomposition théorique nous fournit cependant la clef de la modélisation du véritable prix du concentré.

Il apparait clairement dans l'expression 2.1 que deux variables, la TC de base et le prix du zinc métal, jouent un rôle dans la formation du prix du concentré. La TC spot (variable observable de l'élément E_{TCspot}) ne fait que retranscrire du contenu informationnel depuis le marché du métal, un rôle que le prix du métal peut remplir directement, que ce soit empiriquement ou théoriquement. Nous verrons plus bas que la TC réalisée est de toute façon bien plus liée à la TC de base qu'au prix du métal. Cette formule nous fournit néanmoins une stratégie pour obtenir une formule théorique rigoureuse et cohérente avec nos hypothèses de modélisation. Il suffit de partir de la formule 1.2 et d'enlever les contenus informationnels non désirés, ceux de la TC réalisés et des autres métaux.

Nous partons donc la formule de valorisation 1.2 complète :

$$V = \sum_{n}^{i=1}(P_{Mi} - RC) * (Mc_i * d_i) - (TC + (PZn - PZnB) * Scale) - \sum_{n}^{i=1} P_k$$

Le terme Mc_i correspondant à la présence d'autres métaux utiles que le zinc, peut être soustrait pour ne garder que seul le contenu en zinc M_{Zn} associé le prix du zinc PZn. Le terme

associé aux pénalités P_k disparaît également pour la même raison. La charge de raffinage RC n'est pas appliquée au concentré du zinc, elle est donc éliminée de la formule. La déduction unitaire d_i est soustraite pour les mêmes raisons de simplification. Nous supposons que le contenu métallique du concentré est de 100% [6]. Nous normalisons les facteurs d'échelle à 1, de telle sorte que :

$$V = PZn * M_{Zn} - (TC + (PZn - PZnB) * Scale) \tag{2.2}$$

La neutralisation des quantités de métaux nous permet de passer la formule de valorisation en prix unitaire, soit $V = P_r$ pour une quantité de concentré égale à 1[7]. De la même manière, nous normalisons à 1 le contenu métallique de zinc M_{Zn} : une tonne de concentré ne contenant pas d'impuretés, contient une tonne de métal. Nous pouvons ainsi enlever le contenu informationnel de la TC spot $(PZn - PZnB) * Scale$ qui inclut l'information venant du prix du métal. Nous obtenons donc la relation de la valorisation du concentré ayant le contenu informationnel requis :

$$P_r = PZn - TC \tag{2.3}$$

Les décisions des firmes dans les transactions du concentré peuvent alors être reliées à l'action simultanée de ces deux variables. Nous écartons ainsi la notion de *prix du concentré* issu de la formule de valorisation, source de confusion quant à ce que serait un véritable prix pour le marché du concentré. Même si la formule de valorisation du concentré contient toute l'information disponible, il est nécessaire d'utiliser un prix différent pour observer la formation de l'équilibre sur le marché du concentré séparément de l'équilibre simultané sur le marché du métal. Les liens entre les différentes variables discutées ici sont synthétisées dans le graphique 2.5.

I.2.3 Quel niveau de prix pour le marché du concentré ?

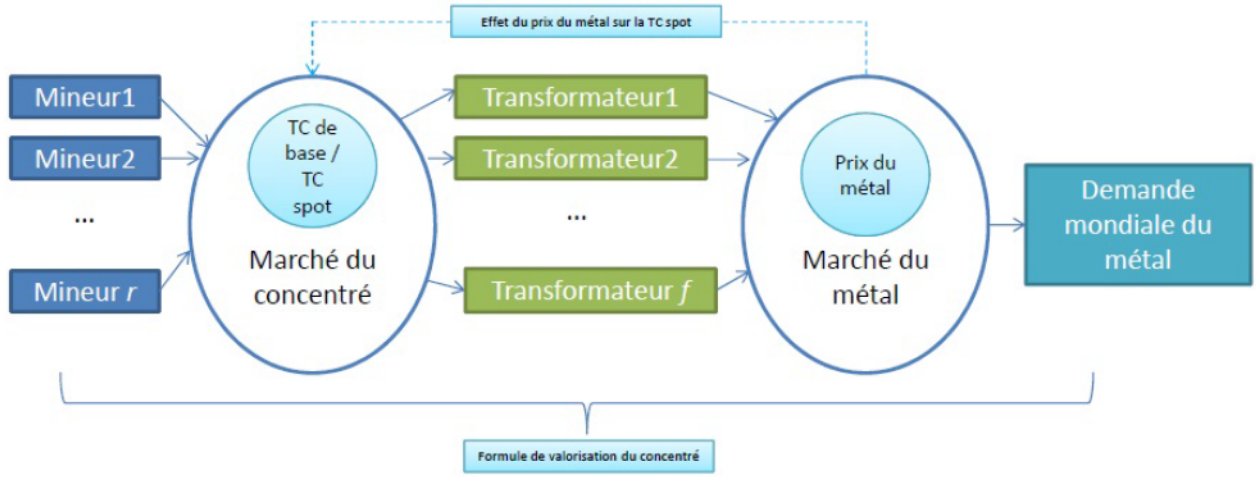
Nous nous trouvons face à une situation paradoxale où le niveau de la TC seul détermine les volumes échangés sur le marché du concentré, mais où l'expression 2.3 reflète mieux le contenu informationnel requis pour faire fonctionner le marché du concentré. Nous allons donc maintenant proposer une interprétation de cette expression et en déduire des conditions d'existence de la TC comme prix du marché du concentré.

Si on considère un marché conventionnel en situation de concurrence pure et parfaite, le profit des transformateurs viendrait de leur offre sur le marché du métal à un prix donné. Ce

[6] Cette hypothèse simplificatrice sera supprimée dans la section II où nous introduisons le paramètre technique de transformation a qui correspond au contenu métallique dans le concentré.

[7] Cette notation P_r correspond à l'idée d'un prix résiduel, expliquée plus bas.

Graphique 2.5: Liens entre les marchés du concentré et du métal



Source : Auteur

prix reflèterait leurs coûts, qui dans la situation concrète que nous examinons est la TC. Il y aurait donc, à l'optimum de concurrence pure et parfaite une égalité stricte entre le prix obtenu pour le concentré et la couverture des coûts de production (la TC) et le prix de revente (le prix d'offre du métal).

Plaçons nous maintenant dans la perspective du mineur : celui-ci doit payer ses propres coûts de production et la transformation de son produit (le concentré) en produit fini (le zinc métal). Si le prix de demande du métal est au niveau de la TC, nous aurons selon l'expression 2.3 $P_r = PZn - TC = 0$. Dans cette situation, le mineur ne produit pas puisque même des coûts de productions infinitésimaux ne peuvent pas être couverts. En ce sens, la situation où le prix du métal PZn est égal à la TC est une *borne haute* (exclue) pour le niveau de la TC, et donc pour le prix résiduel.

Pour que le mineur produise, il faut donc soit que le prix de demande du métal augmente, faisant monter le prix d'équilibre PZn, soit que la TC baisse. La TC ne peut cependant pas baisser en dessous du coût marginal de production des transformateurs, dans la mesure où ceux-ci s'arrêteraient à leur tour de produire. Une *borne basse* (exclue elle aussi), pour le niveau de la TC est donc le coût marginal de production du transformateur représentatif $C_{m,T}$.

Dès lors, l'expression 2.3 s'interprète comme suit : il s'agit de la part de la recette marginale sur le marché du métal qui revient au mineur. Rappelons que le mineur touche empiriquement le prix du métal et reverse la TC. Si la TC devient le prix d'un marché du concentré mais que

la configuration reste la même, le mineur doit donc dégager un profit marginal suffisant pour payer ses coûts et la TC. En conséquence, la valeur P_r, que nous qualifierons de *prix résiduel*, doit être fixée au minimum au montant du coût marginal du mineur représentatif.

Cette configuration alambiquée est le fruit de l'organisation de la filière : nous reviendrons par la suite sur la stabilité de cette situation et sur l'existence et la stabilité de l'équilibre sur le marché du concentré. Le partage des profits dans ce cadre concurrentiel va alors dépendre du niveau de la TC. Celle-ci va osciller entre :

- Une valeur maximale (exclue) PZn où le profit des transformateurs est à son maximum et le profit des mineurs à son minimum ;
- Une valeur minimale égale au coût marginal du transformateur $C_{m,T}$ dont la valeur est connu des seuls transformateurs. Le profit des transformateurs est alors nul et le profit des mineurs maximal.

Si l'on suppose des coûts de production réalistes, la valeur maximale de la TC est égale au coût marginal du mineur $C_{m,M}$ qui doit être payé à l'aide de la recette marginale P_r. A l'optimum, le programme du transformateur est donc de maximiser la TC (le prix sur le marché du concentré) alors que le mineur va chercher à maximiser P_r, soit la différence entre le prix du métal d'équilibre PZn et la TC. Le mineur est donc logiquement à l'opposé du transformateur sur le marché du concentré, mais il reste en fait le véritable interlocuteur de la demande finale sur le marché du métal.

Ajustement par le prix dans un cadre d'équilibre partiel

Il nous reste à évaluer la cohérence de ce schéma de fixation du prix et de partage des profits en étudiant l'impact des variations de la TC. Nous utilisons pour cela des scénarios de statique comparative. Deux déclencheurs peuvent être à l'origine d'une variation de la TC : 1) les négociations annuelles et 2) les coefficients de variation. Les coefficients de variations permettent d'indexer la TC sur les variations du prix du métal. Ainsi, lorsque les variations simultanées de la TC et du prix du métal sont positivement corrélées, la TC varie sous l'impulsion de l'un ou de l'autre procédé. Lorsque les variations de la TC et du prix du métal sont négativement corrélées il s'agit uniquement de la renégociation de la TC.

Nous procédons à l'étude de quatre scénarios de variation du prix résiduel en détaillant les différentes combinaisons de variation du prix du métal (P_m) et de la TC. Ces scénarios sont assez courants du fait des ajustements quantitatifs de la filière. Ils peuvent également servir d'illustration aux conclusions de notre modèle théorique :

Scénario 1. Variation de la TC avec le prix du métal constant

Scénario 2. Variation du prix du métal avec la TC constante

Scénario 3. Variation du prix du métal et de la TC dans le même sens

Scénario 4. Variation du prix du métal et de la TC dans le sens opposé

Afin de mieux comprendre le mécanisme de variation du prix résiduel sous l'impact du prix du métal et de la TC (et donc les liens attendus entre TC et prix du métal) nous faisons un certain nombre d'hypothèses régissant le cadre des ajustements :

- Les variations de la TC affectent le profit du mineur et du transformateur : les deux types de firmes procèdent aux ajustement de leur production en réponse aux variation de la TC.
- Seuls les mineurs réagissent à la variation du prix du métal en ajustant leur production : les transformateurs ne modifient pas leur production en réponse aux changement du prix du métal.

Ces hypothèses correspondent à une transposition formalisée des cas d'ajustements quantitatifs détaillés dans la presse spécialisée (Metal Bulletin, Reuters Metal Insider, USGS). En dehors de leur caractère illustratif, ces hypothèses ont fait objet de validation dans le modèle développé dans la partie suivante, ce qui justifie leur utilisation dans le cadre des scénarios des ajustements. L'intérêt de cette étude est de relier les variations de différentes composantes de la formule du prix résiduel, pour évaluer la cohérence de notre stratégie de modélisation.

Scénario 1 : $P_m = const$ *et* $TC_2 \neq TC_1$

Dans le cas d'une variation de la TC (ex. hausse), la répartition des profits des firmes va évoluer : hausse du profit du transformateur et baisse du profit du mineur. Ainsi, la demande de concentré augmente (augmentation des capacités de transformation, nouveaux entrants), alors que l'offre de concentré diminue. Cette modification de la TC se traduit par un ajustement quantitatif menant à un déficit (retour à l'équilibre si le marché était en excédent). A long terme, les mineurs sont pénalisés par ce niveau de la TC, ils sont donc incités à améliorer la qualité du concentré ou bien à diminuer ses coûts de production (à défaut, une partie des mineurs va quitter le marché) pour se maintenir en activité.

Scénario 2 : $TC = const$ et $P_{m2} \neq P_{m1}$

Ce scénario correspond à une modification du prix du métal (hausse ou baisse), alors que la TC reste inchangée. Il s'agit de fluctuations assez faibles du prix du métal qui n'entrainent pas de modification de la TC par le biais des coefficients de variation. La stabilité de la TC représente un avantage pour les mineurs, car ils profitent du fait que la variation du prix du métal n'est pas accompagnée de celle de la TC. Les transformateurs perçoivent un revenu stable en raison d'absence des variations de la TC.

Dans ce contexte, les firmes doivent choisir entre deux stratégies possibles : modifier les quantités ou ne rien faire. Les mineurs sont incités à augmenter leur production, mais cette décision comporte des risques liés au surplus du concentré sur le marché et à la nécessité d'accepter une TC plus élevée afin de résorber ce surplus (hausse de la TC limitant l'effet de la hausse du prix du métal). Idem pour les transformateurs, ils peuvent profiter de cette situation et réduire davantage les capacités de transformation pour négocier une TC plus élevée. Cette manipulation du marché est impossible si les entreprises sont *price-takers*. En conditions de CPP, la modification du prix du métal fournit un revenu complémentaire aux mineurs, ce qui se traduit par l'augmentation de l'offre de concentré associée à l'augmentation de la TC. La demande de concentré augmente par conséquent en réaction à la hausse de la TC.

Scénario 3 : $P_{m2} \neq P_{m1}$ et $TC_2 \neq TC_1$ ($P_{m2} - P_{m1} > 0$ et $TC_2 - TC_1 > 0$)

Il s'agit d'une des situations les plus courantes où la variation du prix du métal se traduit par une variation de la TC dans le même sens. Il s'agit donc d'un déséquilibre simultané entre l'offre et la demande de métal et de concentré. Une hausse du prix du métal est associée à un déficit du métal, une hausse de la TC caractérise un surplus du concentré. Les mineurs, sous l'action du prix du métal, sont incités à augmenter leur production, surtout si la hausse du prix du métal va compenser la hausse de la TC dans le calcul du revenu des mineurs.

Cette situation illustre le rôle de coordination de la TC, car c'est bien la hausse qui incite les transformateurs à augmenter les capacités de transformation (résorption de l'excédent du concentré et du déficit du métal). L'augmentation de la TC coordonne également l'action des mineurs en limitant la hausse de la production du concentré (en raison de la hausse du prix du métal) qui aurait pu aggraver le surplus du concentré. Cette coordination passe par la prise en compte de l'impact simultané de la variation de la TC et du prix du métal dans le calcul du revenu du mineur. Le même schéma est appliqué lors des ajustements dans le sens inverse : baisse du prix du métal (en cas de surplus du métal) et baisse de la TC en cas de déficit du concentré.

Scénario 4 : $P_{m2} \neq P_{m1}$ *et* $TC_2 \neq TC_1$ $(P_{m2} - P_{m1} > 0$ *et* $TC_2 - TC_1 < 0)$

Ce cas suppose une décorrelation dans le mouvement du prix du métal et de la TC (ex. hausse du prix du métal et baisse de la TC). On constate le déficit de métal et de concentré. Les mineurs profitent doublement de la hausse du prix du métal et de la baisse de la TC, avec un profit très élevés. Le revenu « confortable » des mineurs associé au déficit du concentré et du métal crée les conditions nécessaires pour augmenter les capacités d'extraction supplémentaires (l'ouverture des mines). L'ajustement quantitatif vient du rééquilibrage de l'offre et de la demande de concentré suite à une renégociation de la TC. Une demande de concentré plus élevée permet ensuite d'équilibrer le marché de métal.

Les quatre scénarios que nous venons de détailler confirment notre idée sur la participation de la TC actuelle aux ajustement quantitatifs du concentré. Ces scénarios nous permettent d'évaluer la façon dont les différentes composantes de la formule de valorisation du concentré interagissent. Nous pouvons ainsi constater avec des exemples empiriques que nos hypothèses quant au contenu informationnel des différentes variables sont justifiées.

Les variations du prix du métal peuvent affecter le niveau de la TC, mais ces variations sont considérées par les firmes plutôt comme source de profit ou de perte supplémentaire et n'entraînent pas d'ajustements quantitatifs immédiats. Ainsi, seule la variation de la TC de base donne lieu à des ajustements quantitatifs. Le prix du métal et la TC n'ont pas le même poids dans les décisions des firmes car seule la TC coordonne les décisions des deux types des firmes. Le prix du métal, quant à lui, ne concerne que les décisions des mineurs.

Ceci conclut notre présentation des fondements théoriques de la TC en tant que prix du marché du concentré. Nous avons proposé une revue des rôle et des fonctions d'un prix. Nous avons ensuite examiné les différents candidats au rôle de prix du concentré avant de conclure que la TC était la mieux à même de le remplir. La TC s'est éloignée de son rôle historique du prix de la transformation. Néanmoins, son utilisation en tant qu'élément important de la valorisation du concentré, confirme l'utilité de ce phénomène introduit il y a plus de cinquante ans. La TC représente un vecteur d'information pour les firmes impliquées dans les transactions sur le concentré, une information inégalées sur les plans de production.

Les variations de la TC donnent lieu aux ajustements quantitatifs de l'offre et de la demande du concentré. Les évolutions de la formule de valorisation du concentré ne peuvent pas être interprétées en soi sans connaitre la décomposition de cette variation entre la TC et le prix du métal. Compte tenu des interactions quantitatives entre le concentré et le métal, nous avons fait le choix de les considérer simultanément dans notre modélisation. Nous avons établis que le profit du mineur était en fait conditionné par la part résiduelle du prix du métal une fois la

TC déduite.

Ceci nous a conduit à étudier différents niveaux potentiels pour le prix du concentré, en fonction des variations du prix du métal et des décisions des mineurs et des transformateurs. Dans la section suivante, nous proposons une modélisation formelle de ces scénarios dans un cadre concurrentiel, afin de déterminer le niveau optimal de la TC issue de l'hypothèse 1.

II La modélisation de la TC dans le cadre de l'équilibre partiel

Nous venons de démontrer dans la section précédente que la TC pouvait assumer les fonctions d'un prix théorique, et qu'elle était la plus apte à servir de prix pour le marché du concentré. Nous présentons maintenant notre modélisation en équilibre partiel, sur la base de ce constat. Ceci nous permet de formaliser les expressions de l'offre et de la demande du concentré, en intégrant la TC au programme de production du mineur et du transformateur. Nous pourrons ainsi obtenir un niveau optimal pour la TC (section II.1).

A travers cette modélisation, nous cherchons à identifier les liens entre la TC et les variables de l'offre et de la demande de concentré. Nous souhaitons déterminer les variables à l'origine de la variation de la TC et détailler l'impact de ces variables sur la TC. Ces relations entre la TC et les variables du modèle sont ensuite détaillées dans la section II.2 et calibrées à l'aide de données réelles dans le chapitre 3.

II.1 Interactions entre les mineurs et les transformateurs dans le cadre d'un marché

L'identification de la TC en tant que variable de prix permet de modéliser les interactions entre les mineurs et les transformateurs dans le cadre d'un marché. Cette modélisation en équilibre partiel a l'avantage de fournir un cadre d'analyse simple et clair pour interpréter les phénomènes étudiés. Ce cadre est adapté pour satisfaire notre objectif de vérification de l'hypothèse 2. Nous justifions ce raisonnement en équilibre partiel plutôt qu'en équilibre général en raison de la faible importance des transactions du concentré sur l'économie en général. Le seul marché véritablement concerné est le marché du zinc.

Certaines analyses économiques proposent des modèles de calcul de la rentabilité du transformateur en fonction du prix du métal (Cehlár et Cehlárová, 2007, Tuominen et Kojo, 2005, Osanloo et Ataei, 2003). Nous pensons que ces modèles n'englobent pas toute la problématique du fonctionnement du transformateur. Le prix du métal de référence a un impact sur la profitabilité du transformateur par le biais de la TC indexée sur le prix du métal.

Notre modèle reprend la définition de la valorisation unitaire du concentré P_r et les hypothèses associées à l'usage de la TC comme prix de marché. Le cadre de cette modélisation est donné par les hypothèses de la concurrence pure et parfaite. Les firmes ont des rendements d'échelle décroissants : à long terme le profit des firmes est nul (égalité entre le prix de la vente, le coût marginal et le coût moyen). L'offre est une fonction croissante du prix résiduel (qui inclut le prix du métal et la TC), alors que la demande est une fonction décroissante de ce même prix[8]. Nous postulons également un ajustement sans limites et instantané des facteurs de production : seuls importent donc les coûts marginaux à l'équilibre de long terme.

Conformément à la section précédente, nous postulons que la TC, en tant que prix sur le marché du concentré, doit permettre au transformateur de couvrir ses coûts : en conséquence, la valorisation unitaire du concentré P_r est nécessairement positive ou nulle. La TC ne peut pas avoir une valeur inférieure au prix du métal PZn. Les fonctions de profit du transformateur et du mineur sont concaves, continues et dérivables sur R.

Nous excluons donc, pour les raisons d'exogénéité exposées plus haut, les sources de revenu secondaires pour le transformateur que représentent les produits annexes et le 'free metal'. Nous excluons ainsi de notre analyse les pénalités et les bonus inclus dans la formule du concentré qui peuvent impacter le revenu du transformateur. Les seules sources de revenu pour le transformateur sont alors le revenu de la TC et celui de la vente du métal.

Nous partons de la formule de valorisation unitaire du concentré (relation 2.3) définissant le produit résiduel obtenu par le mineur lors de la vente du concentré. Ce produit résiduel est issu de la formule de valorisation du concentré et tient compte de la déduction de la TC appliquée aux métaux valorisés dans le concentré. Nous intégrons dans cette équation le paramètre technique de transformation a dont la valeur se situe entre 0 et 1. Ce paramètre correspond au contenu métallique dans le concentré [9] :

$$P_r = aPZn - TC$$

[8] Ce qui équivaut à supposer que la demande est une fonction croissante de la TC.
[9] Ce paramètre était fixé à 1 dans la section I.2 pour des raisons de simplification.

Avec P_r la valorisation unitaire du concentré (produit résiduel), PZn le prix du zinc et TC la TC en tant que prix théorique sur le marché du concentré. Le revenu du transformateur R_S se décompose comme le revenu de la vente du métal et le revenu de la TC[10].

$$R_S = PZn * Q_m + TC * Q_c \tag{2.4}$$

Avec Q_m la quantité de métal et Q_c la quantité de concentré. Le transformateur procède à l'achat du concentré où, plus exactement, à l'achat du métal contenu dans le concentré. Les dépenses du transformateur D_S couvrent le prix d'achat du métal et le coût de transformation C_S. Le coût de transformation est fonction de la quantité du concentré transformé $C_S(Q_c)$:

$$D_S = PZn * Q_m + (C_S(Q_c)) \tag{2.5}$$

Le profit du transformateur π_S correspond à la différence entre ses recettes et ses dépenses, il s'écrit donc de la manière suivante :

$$\pi_S = R_S - D_S \tag{2.6}$$

$$\pi_S = PZn * Q_m + TC * Q_c - (PZn * Q_m + C_S(Q_c)) \tag{2.7}$$

En utilisant la condition de 1er ordre :

$$\text{Max}\pi_S : \frac{\partial \pi_S}{\partial Q_c} = 0 \tag{2.8}$$

et de 2nd ordre :

$$\text{Max}\pi_S : \frac{\partial^2 \pi_S}{\partial {Q_c}^2} \geq 0 \tag{2.9}$$

de la maximisation du profit en CPP on obtient l'égalité entre le coût marginal de la transformation Cm_S et la TC[11] :

$$Cm_S = TC \tag{2.10}$$

On retrouve ici le rôle clef de la TC en tant que prix dans la définition du programme de production du transformateur. Les capacités de transformation qui serons mises en place par les firmes dépendent de la valeur de la TC. Tant que le niveau de la TC est supérieur au coût marginal de la transformation, les firmes transformatrices maintiennent leur production. Le seuil de rentabilité du transformateur se situe au niveau où la TC est égale au coût moyen. Le

[10] Le détail du calcul est fourni en annexe C.

[11] La TC correspond au montant anticipé de la recette marginale, alors la TC marginale égale à la TC moyenne.

seuil de fermeture est identifié par le niveau de la TC égale au coût variable (à long terme).

Ce résultat est important surtout par ce qu'il ne dit pas : le transformateur n'intègre pas dans son calcul des coûts le prix du métal : sa rentabilité dépend uniquement de la TC. Ce résultat traduit bien le caractère atypique d'un marché régi par celle-ci, même sous l'hypothèse d'une concurrence pure et parfaite. L'agent rémunérée par la TC ne pèse pas sur l'offre du marché de consommation (celui du zinc métal), il se contente de produire à hauteur de la rémunération fournie par un autre agent (ici le mineur). Ce premier résultat indique donc une subjugation total des transformateurs par les mineurs en situation de CPP.

De la même manière, nous procédons à la formalisation et à la maximisation du profit du mineur. Le revenu du mineur R_M provient uniquement de la vente du métal contenu dans le concentré :

$$R_M = PZn * Q_m \tag{2.11}$$

Le mineur intègre dans ses dépenses D_M son coût d'extraction $C_M(Q_c)$ et la TC, les deux étant fonction de la quantité du concentré Q_c.

$$D_M = C_M(Q_c) - Q_c * TC \tag{2.12}$$

De cette manière, nous faisons l'hypothèse que le mineur intègre dans ses dépenses non seulement ses propres coûts, mais également la TC qui correspond pour le mineur au dépenses pour la transformation du concentré. Ainsi, les dépenses du mineur contiennent la totalité des coûts qu'il supporte pour extraire et transformer le concentré en métal.

$$\pi_M = PZn * Q_m - TC * Q_c - C_M(Q_c) \tag{2.13}$$

L'intégration du paramètre technique de transformation a permet de relier la quantité du concentré à la celle du métal (Equation 2.14) pour ainsi poser la condition de l'infériorité de l'offre du métal à la demande du concentré[12], $DC > SM$.

$$Q_m = a * Q_c \tag{2.14}$$

Avec $0 < a < 1$. On intègre alors l'expression 2.14 dans la formule du profit du mineur 2.13.

$$\pi_M = aPZn * Q_c - TC * Q_c - C_M(Q_c) \tag{2.15}$$

[12]La quantité du concentré et du métal est normalisée par un (une tonne du concentré et du métal). Ainsi, l'application du coefficient a cherche à préciser qu'une tonne du métal est obtenue à partir d'une quantité du concentré plus importante.

On développe à partir de cette expression les conditions de 1er et de 2nd ordre de la maximisation du profit :

$$\text{Max}\pi_M : \frac{\partial \pi_M}{\partial Q_c} \geq 0 \tag{2.16}$$

$$\text{Max}\pi_M : \frac{\partial^2 \pi_M}{\partial {Q_c}^2} \geq 0 \tag{2.17}$$

Ce qui donne le résultat suivant :

$$Cm_M = aPZn - TC \tag{2.18}$$

Le coût marginal optimal du mineur est donc fixé à un niveau correspondant à la différence entre le prix du métal pondéré par la part en métal du concentré (soit la recette marginale du métal *effectivement contenu* dans le concentré) et la TC (soit la rémunération fournie au transformateur pour qu'il produit le métal). Le coût marginal de la production du métal par le mineur inclut donc le coût marginal de l'extraction exprimé en métal effectivement extrait et le coût marginal de transformation, soit la TC.

Notre modèle confirme donc les résultats conceptuels de la partie précédente. La rentabilité des transformateurs ne dépend pas du prix de son produit fini (le zinc métal), tandis que la rentabilité des mineurs dépend non seulement du prix de vente de leur produit fini, mais également d'une première transformation de ce produit. Ainsi, la formation d'un équilibre de long terme sur le marché du concentré ne peut se faire que de façon séquentielle. Le mineur va considérer la demande sur le marché du métal pour estimer une offre de métal à atteindre, selon ses propres coûts et selon le prix possible sur le marché du concentré (la TC). Il va proposer cette offre au transformateur via le prix sur le marché du concentré (la TC). Les transformateurs vont alors produire le volume espéré si le niveau de la TC est compatible avec leur structure de coût. C'est donc le mineur qui décide quel volume va être proposé sur le marché final en tenant compte d'un "coût fixe" à payer aux transformateurs.

Nous avons exclu le revenu de 'free metal' de notre modélisation en raison de son caractère complémentaire au revenu principal de la TC, la totalité de leur revenu dépend donc de la décision du mineur. Les transformateurs se trouvent donc, en conditions de CPP dans une situation ambiguë. Cette situation est a priori extrêmement inconfortable, même si en concurrence pure et parfaite, après quelques itérations, ils sont certains de couvrir au minimum les coûts associés au niveau de production décidé par le mineur. Cette situation présente cependant un avantage : les transformateurs se trouvent de facto protégés des risques de variation du prix du métal, leur rémunération étant en fait au moins partiellement décorrélée de ce qui se passe sur le marché du

métal. Il revient en CPP au mineur de gérer le risque de prix et de fixer les volumes produits. Il est également intéressant de noter que ceci est vrai quelque soit le niveau de la TC. La TC se retrouve ainsi consacrée prix du marché du zinc mais un prix qui est effectivement déterminé par les contraintes de production d'un seul côté du marché.

Les mineurs ont donc une forte responsabilité en CPP, assortie de forts risques. Notre analyse permet tout d'abord de déterminer que le seuil de fermeture et le seuil de rentabilité des mineurs est en fait plus élevé que ne l'aurait révélé une analyse basée uniquement sur la prise en compte du prix du métal. Le mineur peut faire varier la technologie de production et obtenir un contenu métallique plus ou moins important (jouer sur le coefficient a) dans le concentré produit. Il peut également minimiser ses coûts de production. En revanche, seule une partie des variables entrants dans la maximisation du profit du mineur peut être maitrisée exclusivement par celui-ci. Cette conclusion rejoint la conclusion de Crowson (2001) sur l'incapacité des firmes minières d'utiliser les hypothèses réalistes sur les capacités et les prix futurs estimés lors de l'étude du projet[13].

Le prix du métal est indépendant de l'activité du mineur, il s'établit sur le marché du métal[14]. Le mineur est donc soumis aux évolutions de la demande sans "agent tampon". Ceci ne pose pas de problème dans un cadre de CPP, mais peut rapidement devenir problématique si l'on relâche les hypothèses concernant les ajustements de facteurs de production et que l'on met plus de rigidité dans la détermination de la TC (ce qui est effectivement le cas du fait des négociations).

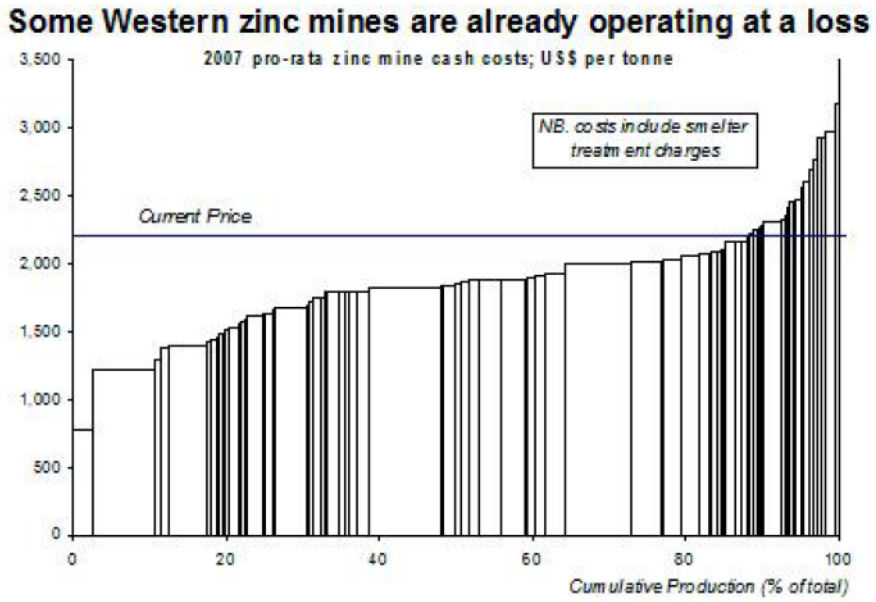
L'hypothèse d'information parfaite est aussi fondamentale pour la détermination de l'équilibre et sa stabilité. Le mineur doit pouvoir estimer précisément les coûts des transformateurs et proposer une TC permettant de couvrir les coûts de transformation. Si la TC estt fixée à un niveau inférieur ou supérieur au niveau aux coûts des transformateurs, le mineur rationne ou surproduit pour le transformateur, indépendamment des quantités demandées sur le marché. Il peut donc être extrêmement difficile de trouver dans ce cadre un équilibre par le tâtonnement walrasien habituel.

Selon CHR Metals Limited (2007) en 2007 environ 10% des mines ouvertes ont fonctionné à perte suite à la baisse du prix du zinc jusqu'à 2378 $/t, moyenne du mois de décembre (Graphique 2.6). Cette situation était caractérisée par un mouvement de fermetures partielles des mines non rentables, ce qui est en conformité avec les conclusions de notre modèle. Actuelle-

[13]Far too little attention is paid in most project appraisals to prospective demand, or to the likely overall balance between demand and supply.

[14]On présentera dans la suite de notre travail les moyens à disposition du mineur pour influencer indirectement le prix du métal en modifiant la quantité produite du concentré (voir chapitre 3). Ce type d'influence n'est pas envisageable dans les conditions de la CPP.

Graphique 2.6: Production minière à perte



Source : CHR Metals Limited (2007)

ment, on situe le seuil de la rentabilité de la plupart des mines en activité autour de 1400-1500 $/t (Brook Hunt, 2010). Le prix du zinc en 2015 a atteint le niveau le plus bas depuis dix ans durant le second et le troisième trimestre se répercutant ainsi sur le revenu des mineurs dont une partie produit déjà à perte (Hanley, 2015).

Il se pose alors la question de la dépendance du revenu du mineur à la valeur de TC. Existe-il une situation où la valeur de TC rendra impossible le fonctionnement de la mine en provoquant un profit négatif ? Cette situation est exclue par les hypothèses que nous avons posées, à savoir une valorisation unitaire du concentré positive ou nulle (ce qui donne $PZn - TC > 0$). Mais si nous relâchions cette hypothèse, une erreur d'appréciation du mineur (ou un temps d'adaptation dans le cadre d'anticipations adaptatives) rendrait très rapidement ses profits négatifs.

Il ressort clairement de ces remarques qu'un équilibre de CPP, au regard de l'organisation actuelle de la filière est très probablement instable, s'il peut être atteint. Si les conditions de la CPP étaient effectivement réunies sur le marché, la TC sous sa forme actuelle serait probablement abandonnée. Il faudrait rapidement la laisser fluctuer librement vers son niveau d'équilibre du marché pour que le mineur puisse produire des quantités optimales au sens de Pareto. Le transformateur prendrait alors à sa charge le risque de marché associé à la vente de métal contre cette nouvelle indépendance du côté de la couverture de ses coûts.

Cet équilibre instable pourrait alternativement donner lieu à des comportements stratégiques, et faire émerger la nécessité d'une coordination plus forte au sein de la filière de fait de

l'incapacité des mineurs à accéder ou à gérer seuls l'information requise. On se retrouve alors dans le cadre de l'hypothèse 1 du précédent chapitre. La version analytique de notre modélisation fait donc clairement ressortir le caractère instable d'un équilibre de marché lorsque le prix est basé sur les décisions d'un seul agent.

Il nous reste cependant la possibilité que les évolutions de la TC, de la TC historique à aujourd'hui, ne soit que le prélude à une transition de la TC vers un prix de marché au sein d'un cadre proche de la CPP. Nous ne pouvons donc pas encore écarter l'hypothèse 2 sur la seule base de ces conditions. Nous proposons en conséquence, avant d'étudier empiriquement la TC, d'adapter notre modèle analytique en modèle calculable afin d'identifier les liens entre la TC et les variables du marché. Nous pourrons alors nous situer dans la "zone d'instabilité" de notre équilibre et déterminer si la TC va vers un rôle de prix de marché ou s'en éloigne.

II.2 Modèle calculable d'équilibre simultané sur le marché du concentré et le marché du métal

Notre modèle s'inspire des travaux de Bruneau et Nicolai (1991) décrivant les interactions entre le marché du pétrole et le marché des produits dérivés du pétrole. Nous définissons le marché du concentré et le marché du métal sur la base des fonctions d'offre et de demande et des variable de prix qui y sont associées. Nous dissocions le marché du métal et celui du concentré en raison de l'utilisation de deux variables de prix distinctes : prix du métal et prix sur le marché du concentré exprimé par la TC.

Nous reprenons les hypothèses du modèle analytique en les complétant pour les besoins des simulations. Nous supposons que les marchés du concentré et du métal sont en concurrence pure et parfaite. Les deux biens, le concentré et le métal, sont homogènes et uniformes, il n'existe pas de substituts à ces deux biens. Le prix de chacun de ces deux biens est unique et il égalise l'offre et la demande. Le stock du concentré et celui du métal sont considérés comme nuls. L'offre et la demande sur chaque marché sont de forme linéaire pour des raisons de simplification des calculs.[15]. Les élasticités prix de l'offre et de la demande proposées dans notre modèle sont constantes[16]. Le prix des biens est normalisé par un. Les fonctions proposées sont continues et dérivables sur R.

[15]Nous sommes conscients des limites de ce type de formalisation, notamment en ce qui concerne l'approximation par une relation linéaire de toute relation modélisée qui se présente sous autre forme que la forme linéaire.

[16]Nous raisonnons dans les conditions du marché exempt de produits substituts, ce qui permet d'exclure théoriquement une variation de l'élasticité en réponse à la variation du prix du bien.

Nous excluons de cette analyse les intermédiaires (ex. négociants) qui peuvent être impliqués dans les transactions physiques ; cette exclusion est justifiée par le souci de limiter notre analyse aux firmes impliquées uniquement dans la production des biens échangés. Les intermédiaires remplissent une fonction logistique en permettant des échanges entre l'offre et la demande disparates en termes de la localisation géographique, des volumes vendus et achetés, de la qualité du concentré, etc. Pour l'instant, ces activités dépassent le cadre de notre modélisation et peuvent être assimilés à des coûts de transaction.

Les transformateurs achètent le métal contenu dans le concentré et ils vendent le métal obtenu après la transformation : la TC obtenue par les transformateurs correspond au prix de la transformation et représente le seul revenu des transformateurs. La valorisation du concentré se fait à l'aide du prix du métal, variable de prix du marché du métal. On considère uniquement la production primaire du métal et on exclue la production secondaire (recyclage) de notre modèle.

Nous partons de la condition de maximisation du profit du mineur établie plus haut (équation 2.18) :

$$P_r = aPZn - TC$$

Avec P_r le produit résiduel, TC la TC appliquée, P_m le prix du métal et a le paramètre technique de transformation $(0 < a < 1)$.

La maximisation du profit du mineur et du transformateur permet de définir les programmes de production de ces deux types de firmes et d'en déduire respectivement l'offre de concentré et la demande de concentré. Notons que l'offre et la demande de concentré ne sont pas modélisées en tant que fonctions de la même variable. Ceci est conforme aux résultats du modèle analytique, où la demande de concentré est uniquement liée à la TC (maximisation du profit des transformateurs) alors que l'offre de concentré dépend de la condition de maximisation du profit des mineurs établie plus haut.

$$S_C = f(P_r) \tag{2.19}$$

$$D_C = f(TC) \tag{2.20}$$

L'offre de concentré S_C est une fonction du produit résiduel P_r. La demande de concentré D_C est une fonction de la TC. On définit les fonctions d'offre et de demande en tant que fonction

linéaires simples :

$$S_C = gP_r + v \tag{2.21}$$

Avec g, l'élasticité prix de l'offre de concentré et v le vecteur des variables économiques affectant l'offre de concentré, avec $g, v > 0$. L'offre de concentré est une fonction linéaire croissante du prix résiduel :

$$D_C = bTC + k \tag{2.22}$$

Avec b l'élasticité de la demande de concentré en réponse à la TC et k le vecteur des variables économiques affectant la demande de concentré et $b, k > 0$. La demande de concentré est une fonction linéaire croissante de la TC.

L'offre de métal est obtenue à partir de la demande de concentré à l'aide du paramètre technique de transformation a et elle est formulée ainsi :

$$S_M = aD_C \tag{2.23}$$

La demande de métal est modélisée en tant que fonction linéaire du prix du métal avec une élasticité négative du prix du métal.

$$D_M = -ePZn + n \tag{2.24}$$

Avec e l'élasticité de la demande de prix du métal, n le vecteur des variables économiques affectant la demande de métal, et $e, n > 0$. La demande de métal est une fonction décroissante du prix du métal. Les conditions de l'équilibre simultané sur le marché du concentré et sur le marché du métal s'écrivent donc :

$$S_C = D_C \tag{2.25}$$

$$S_M = D_M \tag{2.26}$$

Notre modèle est donc composé d'un système de 7 équations représentant l'équilibres simultané sur le marché du concentré et sur le marché du métal. Nous avons, pour ces 7 équations, 7

inconnues : $S_C, D_C, S_M, D_M, P_r, PZn, TC$ et 7 paramètres : g, v, b, k, a, e, n :

$$S_C = gP_r + v \tag{2.27}$$
$$D_C = bTC + k \tag{2.28}$$
$$S_M = aD_C \tag{2.29}$$
$$D_M = -ePZn + n \tag{2.30}$$
$$S_C = D_c \tag{2.31}$$
$$S_M = D_M \tag{2.32}$$
$$P_C = aPZn - TC \tag{2.33}$$

Le modèle ainsi introduit retranscrit la formulation analytique présentée précédemment. Ce modèle reflète les liens entre le marché du métal et le marché du concentré et conserve les variables de décision propres au programme de maximisation de chaque type de firmes. Plusieurs remarques peuvent être faites concernant le modèle ainsi obtenu. Tout d'abord, le caractère inhabituel de la fonction de la demande de concentré. Il s'agit d'une fonction positive de la TC, ce qui la distingue de la fonction de demande standard, fonction négative du prix. Cette expression de la demande reflète les réactions des firmes transformatrices demandant plus de concentré lorsque la TC est élevée.

Les vecteurs de variables affectant l'offre et la demande sont intégrés à l'aide des paramètres. Cette simplification est justifiée par l'objectif de notre travail, celui de la modélisation de la TC sous l'impact de ces paramètres. L'intégration des variables affectant l'offre et la demande sous forme fonctionnelle plus complexe constitue une des pistes de travaux futurs.

Nous procédons ensuite à la résolution de ce système d'équations. Le détail est fourni dans l'annexe D. L'expression de la TC ainsi obtenue dépend uniquement des paramètres du modèle dont on peut mesurer l'influence à l'aide des dérivées partielles. L'existence des relations entre la TC et les paramètres du modèle permet d'identifier le comportement théorique de la TC et le comparer avec celui d'une variable de prix.

Nous obtenons une expression de la TC à partir des paramètres du modèle :

$$TC = \frac{-ek - a^2gk + agn + ev}{be + a^2bg + eg} \tag{2.34}$$

La réponse de la TC à la modification de ces paramètres est étudiée à l'aide le calcul des dérivées partielles. Le tableau 2.1 synthétise les résultats obtenus[17].

[17] Le détail des calculs est disponible en annexe D.

Tableau 2.1: Etude des dérivées partielles de la TC

Variable	Nom de la variable	Signe de la dérivée partielle
k	Vecteur des variables économiques affectant la demande du concentré	"-"
b	Elasticité TC de la demande du concentré	" ?"
v	Vecteur des variables économiques affectant l'offre du concentré	"+"
g	Elasticité prix de l'offre du concentré	?
n	Vecteur des variables économiques affectant la demande du métal	"+"
e	Elasticité prix de la demande du métal	"+"
a	Coefficient de transformation technique	"-" ou "+/-"

Source : Auteur

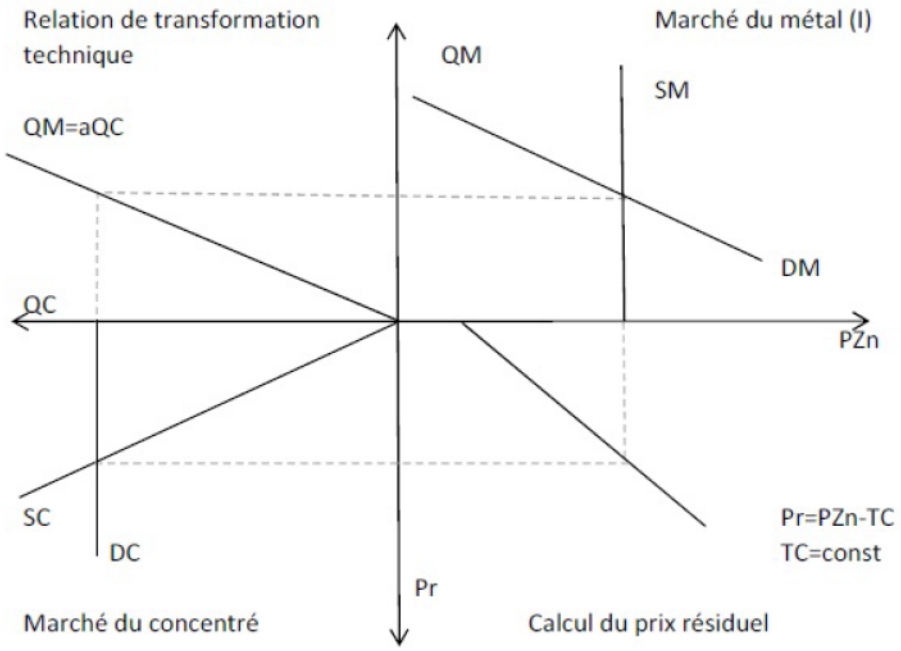
Nous constatons qu'une hausse de la demande de concentré est liée à une baisse de la TC et inversement, résultat logique, les transformateurs acceptent une TC plus basse pour assurer le remplissage de leurs capacités de transformation. De même, l'offre de concentré est positivement lié à la TC : lorsque l'offre augmente, les mineurs doivent augmenter la TC pour que la demande suive.

En dehors de ces conclusions attendues, nous pouvons maintenant identifier les relations entre les marchés dans le cadre de notre modèle. Nous observons tout d'abord que la demande de métal est positivement liée à la TC. Ce résultat peut s'expliquer par une décision des mineurs qui veulent profiter d'une hausse de la demande en métal et proposent donc une TC plus élevée, On retrouve alors la logique présentée plus haut.

La relation entre le contenu métallique et la TC semble être plus complexe. Si le contenu métallique est élevé, la TC serait également plus élevée, ce qui veut dire qu'on s'attend à une TC plus importante pour la transformation d'un concentré plus riche. Une autre explication est l'existence du seuil du contenu métallique à partir duquel le contenu métallique élevé correspond à une TC plus basse, une non linéarité que notre modèle ne nous permet pas de capter.

Il est difficile de confirmer empiriquement cette relation, car nous ne disposons pas de données historiques sur le contenu métallique du concentré échangé. On peut émettre l'hypothèse qu'aujourd'hui cette relation s'explique plutôt par le souhait des transformateurs d'acheter un concentré plus pur. Lorsque la TC est basse, la transformation d'une tonne du concentré procure un revenu bas au transformateur, celui-ci voudrait compléter son revenu par la vente de "free metal", ce qui ne serait possible uniquement si le concentré est riche en métal.

Graphique 2.7: Equilibre simultané sur le marché du concentré et le marché du métal



Source : Auteur

Nous pouvons représenter graphiquement les liens entre le marché du concentré et le marché du métal à l'aide des fonctions d'offre et de demande (graphique 2.7). Nous utilisons l'expression linéaire de la demande de métal, fonction du prix du métal et l'expression linéaire de l'offre de métal (complètement inélastique au prix du métal) ce qui nous permet d'obtenir la valeur du prix du métal de l'équilibre. La relation de transformation permet de relier le marché du métal au marché du concentré et ainsi exprimer la demande de concentré en tenant compte du coefficient de transformation ($aQ_c = Q_m$).

On retrouve l'offre et la demande de concentré sur le marché avec la fonction de l'offre de concentré exprimée en tant que fonction linéaire du prix résiduel et la foncions de la demande de concentré inélastique par rapport au prix résiduel, avec la TC étant la constante dans cette équation ($P_r = PZn - TC$), lorsque le prix du résiduel est nul, le prix du métal est égal à la TC.

L'offre de métal émanant des transformateurs, est inélastique au prix du métal. La demande du concentré est liée à l'offre du métal par la relation de transformation technique. La demande de concentré et l'offre de concentré sont ensuite reliées sur le marché du concentré à l'aide du prix résiduel. Le lien entre le prix résiduel et le prix du métal pour la quantité du concentré produit s'effectue à l'aide de la TC dont la valeur fluctue.

Le modèle statique de l'équilibre partiel que nous venons de proposer dans ce chapitre est une première tentative de formalisation de l'équilibre simultané sur le marché du concentré et celui du métal. Cette forme calculable du modèle nous permet de tester différentes configurations du marché, de situer la TC actuelle vis-à-vis de ces configurations et de proposer ainsi une validation/invalidation de l'hypothèse 1 dans ce chapitre et une prospective au chapitre suivant.

Notre modèle théorique pose les bases de la modélisation de la TC en tant que variable de prix. Nous avons identifié que la TC peut remplir le rôle d'une variable de prix en théorie. Même si analytiquement la TC peut être considérée comme un prix, l'équilibre modélisé dans les conditions de la CPP est instable compte tenu du contenu informationnel qu'elle englobe. Cette conclusion a des implications sur la vision de la TC que nous avons proposée dans le chapitre 1. Le contenu informationnel de la *TC-benchmark* est plus faible que celui de la *TC-prix*, ce qui explique les comportements stratégiques des firmes.

L'adaptation du modèle analytique en modèle calculable a permis d'identifier le lien entre la TC et les variables du marché. Malgré l'instabilité constatée de l'équilibre, on conclut que la TC se rapproche d'une variable de prix compte tenu de ses ajustements théoriques en réponse aux paramètres du modèle.

Dans un premier temps notre modèle pourrait être appliqué empiriquement sur les données réelles afin de déterminer les valeurs d'équilibre des variables. La stabilité de l'équilibre obtenu pourrait ainsi être testée. L'utilisation de la programmation non-linéaire correspondrait à un développement naturel de ce type, c'est la raison pour laquelle nous optons pour cette solution dans le chapitre 3.

Ce modèle peut également servir de base pour une étude économétrique des facteurs explicatifs de la TC. L'équation définissant la TC à l'aide des paramètres du modèles peut servir de base pour cette application. Cette application correspondrait à une validation empirique des dérivées partielles issues de l'équation de la TC. Malgré son intérêt, cette application dépasse le cadre de notre travail et nous la considérons en tant que piste de recherche à venir.

Ce modèle pourrait être enrichi assez aisément pour tenir compte d'autres éléments du contrat du concentré, notamment de la présence de plusieurs métaux dans le concentré et des pénalités. Un développement logique de ce modèle consisterait en la prise en compte des stocks qui viennent en tant que variable d'ajustement entre l'offre et le demande de concentré et de métal respectivement. Enfin, une introduction dans la modélisation du marché financier (simultanément à l'équilibre avec le marché du métal et le marché du concentré) pourrait correspondre au développement naturel du modèle inspiré par les travaux de Bruneau et Nicolai (1991).

Nous validons ainsi la première étape du test de l'hypothèse 2 sur l'utilisation de la TC en tant que prix. La seconde étape de la validation consiste en étude empirique des propriétés statistiques de la série TC. Nous cherchons à identifier le processus à l'origine des variations de la TC et le comparer avec le processus du prix issu du modèle Cobweb.

III La TC en tant que quasi-prix : propriétés statistiques et validation empirique

Nous disposons maintenant d'un cadre d'analyse et de conclusions analytiques sur la validité de l'hypothèse 2. Nous allons maintenant procéder à une tentative de validation empirique. Nous étudions les caractéristiques statistiques de la série historique de la TC pour observer les propriétés pouvant justifier empiriquement le positionnement de la TC en tant que variable de prix.

Nous cherchons à identifier le processus à l'origine de la variation de la TC et à déterminer si l'information contenue dans le prix du concentré pourrait être approximée par la TC, c'est-à-dire si la TC est une bonne variable pour représenter le prix réel du concentré tel qu'il aurait pu exister sur le marché du concentré. Nous présentons également les témoignages des firmes impliquées dans les transactions sur le concentré au sujet de la place de la TC. Les intervenants soutiennent l'hypothèse d'un rôle central de la TC et confirment son impact sur le profit des firmes impliquées dans les opérations physiques avec le concentré.

III.1 Stratégie empirique visant la validation de la TC en tant que prix

Dans cette partie nous nous intéressons à la TC de base, ses propriétés statistiques et son caractère adapté aux fonctions de la variable de prix. D'abord nous étudions la relation entre la TC de base et le prix du métal pour comprendre les liens entre ces deux variables et l'ajustement de la TC à l'aide des coefficients de variation. Ensuite nous détaillons les propriétés statistiques de la série temporelle de la TC, en justifiant l'usage de la série de base et de la série TC réalisée, identifiant le processus dynamique de la variation de la TC.

III.1.1 Quel objet et quelle série pour la procédure de test ?

Nous avons identifié tout au long de ce chapitre les fonctions du prix du marché qui justifient de donner ce rôle à la TC. Une multitude d'applications réelles dans le cadre du contrat de concentré correspondent au concept de valorisation qui diffère d'une transaction à une autre. La valorisation du concentré pour deux transactions distinctes pourrait être identique uniquement si on suppose une stabilité du prix du métal et de la TC réalisée[18], ainsi qu'une composition identique du concentré échangé lors de la transaction.

La particularité des échanges du concentré réside donc dans le fait que le prix ne peut pas être connu à l'avance avec certitude, seules sont connues les composantes de ce prix et la méthode de calcul applicable. Les intervenants sur le marché sont au fait de cette réalité et basent leurs décisions sur des variables telles que le prix du métal et la TC (voir le graphique 1.16 dans la section III). Notre analyse recouvre donc la pratique au sein de la filière. Il nous reste à trouver un cadre d'analyse correspondant à cette situation.

La littérature comporte un nombre relativement important d'études sur les séries statistiques de prix et notamment sur les processus statistiques à l'origine de la variation des prix des matières premières. On trouve également des références traitant de la formation des prix des produits dérivés des matières premières. Nous ne présenterons ici que les travaux consacrés au marché du métal. Nous nous sommes particulièrement intéressé aux travaux portant aux études du processus statistique des variables de prix (processus à mémoire courte ou longue, convergence dynamique Cobweb, cointégration). Nous n'avons pas retenu les travaux sur l'étude des prix des futures et autres instruments financiers, notre sujet n'étant pas valoriser le concentré dans une perspective de couverture[19].

Le débat sur la nature des variations des prix n'est pas tranché. Les processus de prix sont modélisés à l'aide des modèles ARMA (Deaton et Laroque, 1992) et des modèles TS et DS (Géronimi *et al.*, 2003). Dooley et Lenihan (2005) propose des modèles explicatifs de la variation des prix des matières premières basées sur une modélisation ARIMA plutôt que sur les prix retardés des futurs. Ahrens et Sharma (1997) procèdent à l'identification de tendances dans les prix des matières premières. Sur l'échantillon de onze matières premières, une partie est caractérisée par la présence d'une tendance stochastique alors qu'une autre partie affiche une tendance déterministe.

Le travail de Chatrath *et al.* (2002) associe un processus de type ARCH avec effets saison-

[18] Selon le niveau des coefficients de variation de la TC.

[19] Ce thème est cependant l'un des nombreux thèmes que nous souhaitons aborder plus en détail après la conclusions des présents travaux.

niers à l'évolution des prix des matières premières agricoles. Gil-Alana *et al.* (2015) proposent une étude des dynamiques de long terme des prix des métaux précieux à l'aide de modèles ARMA et concluent à l'existence de chocs permanents des facteurs externes sur les prix.

L'identification du processus à l'origine des variations de prix permet ensuite de se prononcer sur la tendance générale de ces variations. Certains auteurs ont cherché à évaluer la convergence d'un prix vers un équilibre de long terme ou bien l'existence d'un comportement chaotique ne permettant pas d'atteindre une valeur d'équilibre. Anokye et Oduro (2013) proposent ainsi un modèle Cobweb linéaire pour l'étude des variations de prix. Selon Reitz et Westerhoff (2007) les ajustements de prix sous l'impact du trading des fondamentalistes permettent un retour du prix vers une valeur d'équilibre après un choc. On peut considérer un choc comme important lorsqu'il écarte durablement le prix de sa valeur estimée d'équilibre : le choc est faible autrement.

Hommes (1994) explore les dynamiques d'ajustement des prix et des quantités dans le cadre du modèle Cobweb pour déterminer les origines de déviations chaotiques des dynamiques de prix. Hommes (1998) propose lui un modèle Cobweb non-linéaire pour juger des évolutions de prix en lien avec le comportement rationnel des agents dont les décisions sont basées sur les observations passées des prix.

Malgré la simplicité apparente du modèle Cobweb, l'introduction de non-linéarités dans les fonctions d'offre et de demande permet d'obtenir des conclusions assez robustes. Ceci explique sa popularité dans la littérature : il reste à ce jour le meilleur test de la convergence d'une variable vers un niveau d'équilibre donné. Nous retenons donc le principe d'un modèle Cobweb pour le test de l'hypothèse 2. Mais ceci ne nous permet pas encore de sélectionner la série à tester avec ce modèle.

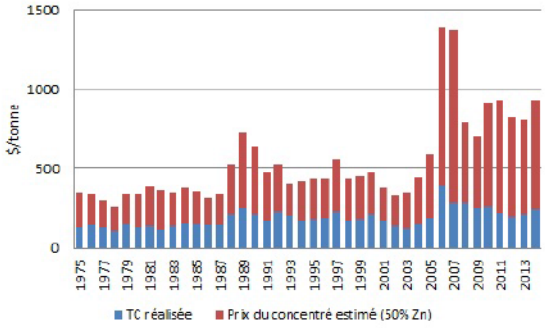
Nous pouvons relier des chocs d'offres et de demande (quantités) à des variations de prix (le prix du métal et la TC pour le marché du concentré). Nous devons pour ce faire en passer par un hypothèse d'homogénéité du concentré car il nous est impossible d'identifier ce type de réaction pour chaque type de concentré en fonction de son contenu. Le prix du métal représente dans la formule de valorisation du concentré un montant relativement plus important que la TC, néanmoins cette différence relative s'explique principalement par la qualité du concentré.

Logiquement, le prix du métal est relativement plus important dans la valorisation totale lorsque le concentré est riche en métal. L'impact du prix du métal tend à diminuer au profit de la TC pour le concentré peu riche ou bien pour le concentré de plusieurs métaux. Ce phénomène est illustré par le graphique 2.8 en utilisant les mêmes valeurs du prix du métal et de la TC pour l'estimation du prix résiduel avec deux contenus métalliques différents : 50% et 35% [20].

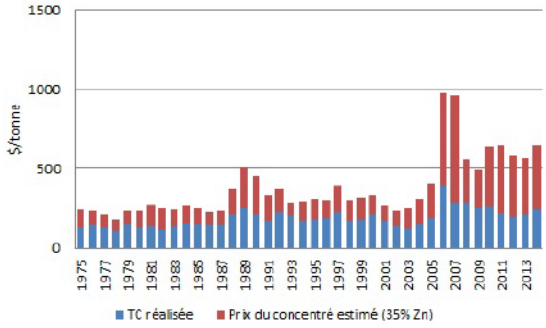
[20]Le contenu métallique correspond à la variable technique de transformation utilisée dans notre modèle

Graphique 2.8: Part de la TC dans la valorisation du concentré de zinc

(a) Contenu métallique de 50%



(b) Contenu métallique de 35%



Source : Euromin et calculs de l'auteur

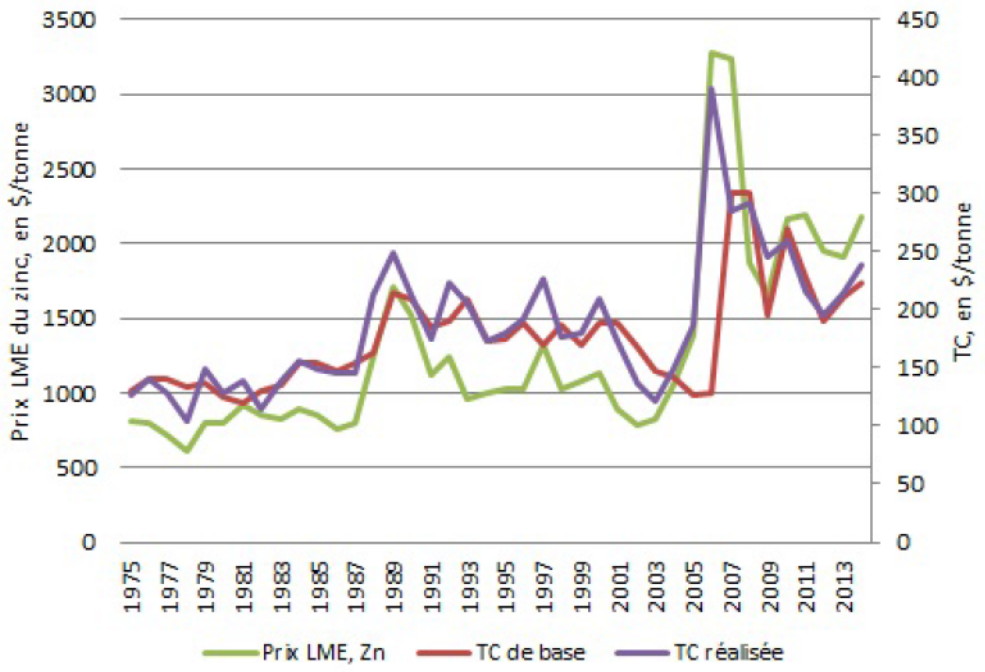
La part de la TC dans la valorisation du concentré augmente avec la baisse du contenu métallique pour des valeurs de la TC et du prix du métal similaires. Inversement, lorsque le contenu métallique est plus élevé, l'impact de la TC tend à diminuer compte tenu de la réduction de la part de la TC dans la valorisation du concentré. Ainsi, tout travail de modélisation statistique basé sur la valorisation du concentré se heurte à un problème d'identification de ce prix.

Par exemple, on pourrait calculer le prix résiduel à un moment donné pour le concentré de chaque composition chimique possible. On pourrait également étendre ce calcul à une période plus longue en tenant compte de la fixation journalière du prix du métal. Néanmoins, les plages des données obtenues ne seront pas représentatives des transactions effectuées et ne permettront pas d'identifier les tendances du marché en raison de l'impossibilité de distinguer entre l'effet prix du métal et l'effet TC.

Si nous utilisons la TC de base, nous perdons donc de l'information car 1) le concentré n'est pas homogène et 2) l'information sur le prix du métal, dont le mineur a besoin, ne peut pas être estimée à partir de la TC, car le prix du métal n'est pas empiriquement proportionnelle à la TC. Ces limites nous obligent à une dernière étape avant de procéder à l'estimation de notre modèle Cobweb. Nous ne pouvons pas, du fait du manque de données, contrôler la première limite, mais nous pouvons évaluer le poids de la seconde en étudiant plus avant les liens entre la TC et le prix du métal.

théorique. Pour les raisons de simplicité, ce contenu métallique était considéré comme identique à tous les concentrés échangés dans le respect de l'hypothèse de la proportionnalité.

Graphique 2.9: TC de base et prix du zinc



Source : Euromin

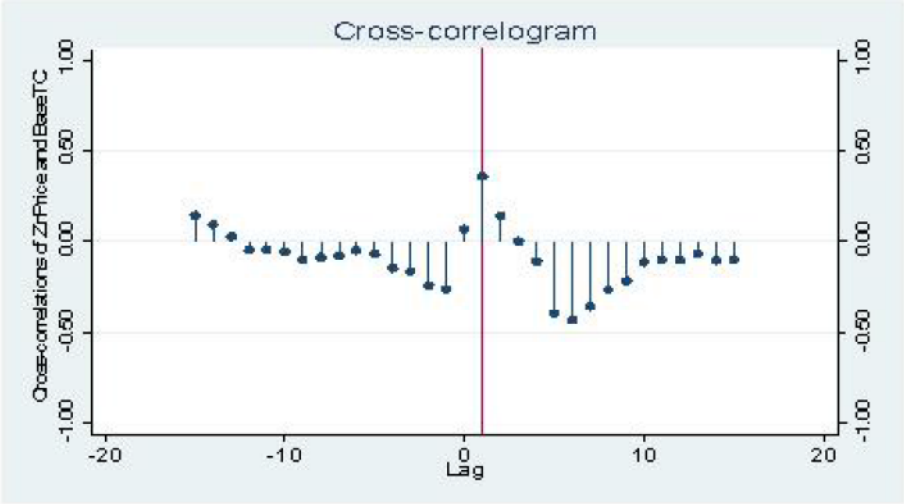
III.1.2 Les liens entre la TC et le prix du métal

Dans notre modèle théorique, nous présentons le rôle indirect du prix du métal dans la détermination de la TC de base via l'équilibre du mineur. Il n'y a cependant pas de lien direct entre prix du métal et TC de base puisque les transformateurs ne tiennent pas compte du prix du métal. Ce résultat a trouvé une première confirmation dans l'absence de proportionnalité entre TC et prix du métal dans la formule de valorisation du concentré (graphique 2.8). Il nous reste à évaluer les limites de cette indépendance.

Nous utilisons la TC de base, c'est-à-dire la TC qui est fixée annuellement et dont le niveau est connu de tous les agents sur le marché. Ce choix s'impose du fait des liens mécaniques (indexation) entre TC réalisée et prix du métal. Une première approche graphique (graphique 2.9) permet de supposer une évolution conjointe des séries avec un léger retard d'ajustement de la TC.

Afin de juger de la corrélation entre les deux séries, nous procédons au calcul du coefficient de corrélation de Pearson de la TC de base avec le prix du zinc. La valeur obtenue est de 0.569 ce qui définit une relation linéaire entre les deux variables. L'observation de la corrélations entre la TC de base et le prix du zinc (graphique 2.10) confirme l'importance de la corrélation entre

Graphique 2.10: Correlogramme croisé : TC de base et prix du zinc



Source : Euromin

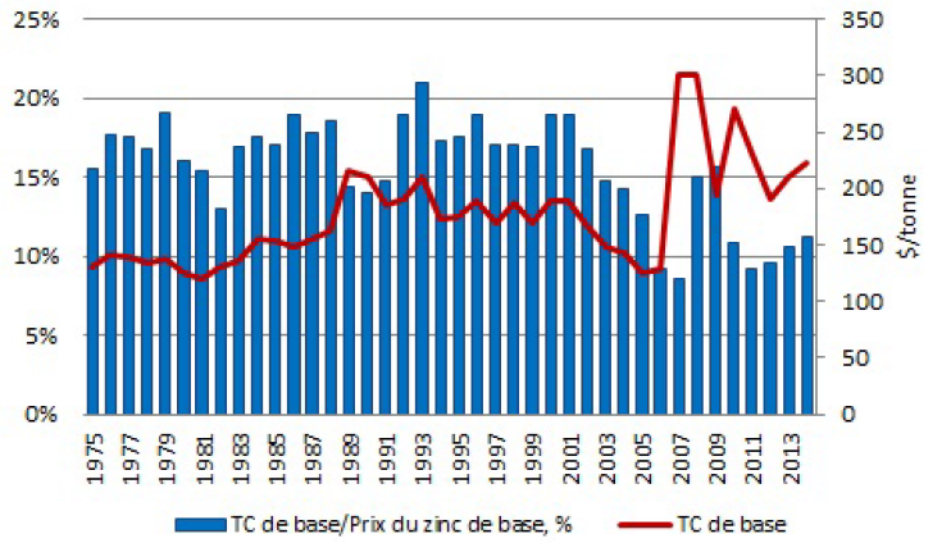
ces deux variables une fois pris en compte les retards[21]. Notons que la corrélation entre les deux variables est positive lorsqu'on introduit un retard, au delà de deux retards la valeur devient négative. Ce résultat confirme la nature ambivalente de la relation entre le prix du métal et la TC en fonction de la période considérée. Nous confirmons ce constat par l'étude du ratio entre la TC et le prix du métal.

Nous calculons le ratio *TC base /prix du zinc de base*, exprimé en pourcentage. Nous cherchons à comprendre à travers ce ratio si la TC représente une proportion stable dans le prix du métal. La stabilité de ce ratio indiquerait que lorsque le prix du métal et la TC varient, les déterminants de ces variations sont communs aux deux variables et la corrélation est réelle. Les transformateurs obtiennent une part fixe du prix du métal, quel que soit le prix du métal. Si le ratio obtenu ne présente pas de stabilité dans le temps, on pourra considérer que la TC et le prix du métal fluctuent sous l'impact de variables explicatives différentes : nous sommes donc en présence du corrélation fallacieuse, qui trouve ça source dans une troisième variable non observée.

Le ratio *TC base /prix du zinc de base* est présenté sur la figure 2.11. On note une certaine cyclicité dans les occurrences, avec des fluctuations entre 14% et 20% en début de période. Après les pics en 2000 et 2001 ce ratio baisse indépendamment de l'évolution du prix du zinc (augmentation jusqu'à 2006 suivie d'une baisse). Cette baisse du ratio de la TC par rapport au prix du métal représente un gain substantiel pour les mineurs traduisant la compensation du

[21]Le calcul des valeurs sur le graphique intègre la corrélation entre la première variable à la date t avec la seconde variable à la date $t+1$.

Graphique 2.11: La part de la TC de base dans le prix du zinc de base



Source : Euromin et calculs de l'auteur

prix faible du métal par la TC.

Les changements du ratio *TC base /prix du zinc de base* s'expliquent principalement par le rapport de force entre les mineurs et les transformateurs. Néanmoins, d'autres facteurs tels que la disponibilité du concentré, l'équilibre entre l'offre et la demande, le taux de change du dollar par rapport à la monnaie nationale des firme peuvent être à l'origine des changements de ce ratio. La TC et le prix du métal sont deux variables corrélées, mais elles évoluent d'une manière indépendante[22]. De plus, la moyenne des facteurs d'inflation associée à la TC de base et au prix du métal est de 1,61, ce qui correspond à une collinéarité négligeable entre ces deux variables.

Il n'existe donc pas de corrélation directe ou de relation linéraire entre la TC de base et le prix du métal. Il est cependant possible qu'une relation non linéaire existe (en partie capté par le coefficient de corrélation). Nous complétons donc l'analyse par la recherche d'une relation de long terme entre les deux variables.

Nous réutilisons la procédure présentée au chapitre 1 en ne mobilisant que deux variables au lieu de trois. Nous concluons cette fois-ci à une absence de relation de cointégration[23]. Il n'y a donc pas de liens entre la TC et le prix du métal dans ces séries en base annuelle.

[22]Nous avons testé de résultat à l'aide d'un test de normalité : le ratio n'est pas normalement distribué, les variations observées ne sont donc statistiquement pas le fruit du seul hasard.

[23]Comme dans le chapitre 1 nous sommes conscients que le nombre d'observations dont nous disposons est assez réduit et limite la portée de ce test.

Cependant, en dehors de la TC de base, d'autres éléments du contrat du concentré sont négociés (le prix du zinc de base, les coefficients de variation, les pénalités). Dans le cadre du contrat de concentré, il est donc possible d'observer la TC réalisée (spot), qui forme une série journalière, selon la formule de valorisation du concentré 1.2 :

$$TC_{spot} = TC_{base} + (PZn - PZnB) * Scale) \tag{2.35}$$

avec TC_{spot} la TC réalisée, TC_{base} la TC annuelle $PZnB$ le prix du zinc de base associé à la TC annuelle, PZn le prix du zinc spot, $Scale$ le coefficient de variation de la TC. Nous pouvons alors étudier les liens entre l'ensemble de ces variables à l'aide la causalité en sens de Granger (voir le tableau 2.2) : nous tenons ainsi compte des observations passées de chaque variables dans notre analyse des corrélations.

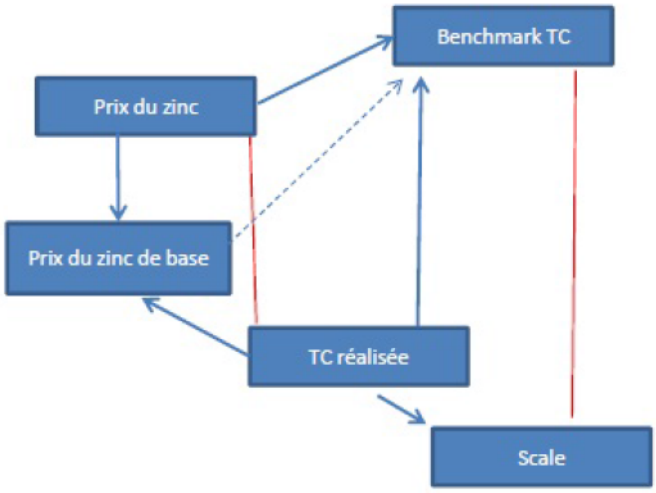
Tableau 2.2: Estimation des relations de causalité

	Prix de zinc	5.535
TC de base	Prix de zinc de base	8.055
	TC réalisée	2.7405
	Coef. de variation	.64113
	Stock	21.829***
Prix de zinc	TC de base	155.61***
	Prix de zinc de base	205.53***
	TC réalisée	5.3832
	Stock	16.298***
Prix de zinc de base	TC de base	9.4823*
	Prix de zinc	6.5156
	Stock	24.678***
TC réalisée	Prix de zinc	4.6511
	Prix de zinc de base	125.22***
	Coef. de variation	10.074**
	Stock	10.736**
Coef. de variation	TC de base	2.8217
	TC réalisée	.92878
Stock	TC de base	5.1429
	Prix de zinc	7.8512
	Prix de zinc de base	3.8468
	TC réalisée	16.322***

Source : Auteur

H0 : absence de causalité *, ** et *** indiquent la significativité à 1%, 5% et 10% respectivement

Graphique 2.12: Causalité entre les variables du contrat du concentré et les variables réalisées



Source : Euromin et calculs de l'auteur

La TC réalisée à l'inconvénient d'être une variable calculée et donc d'être fortement corrélée au prix du métal autant qu'à la TC de base (coefficient de corrélation de 0.8485 pour les observations journalières de la TC et du prix du zinc). Elle se trouve au cœur des nombreuses métriques du contrat de concentré (schéma 2.12), qui ont rendu notre long travail de conceptualisation théorique nécessaire. Sur le schéma 2.12 les flèches indiquent une causalité au sens de Granger, les traits rouges une absence de causalité et la flèche en pointillé une causalité significative seulement au seuil de 10%.

Les liens entre la TC réalisée et le prix du métal forment une première surprise. Il n'y a pas de causalité au sens de Granger de la TC réalisée vers le prix du métal et inversement. Ces variables sont liées par la formule de calcul à travers les coefficients de variation, mais elles ne sont pas liées au sens de Granger. Nous constatons également que les réalisations passées de la TC réalisée causent celles de la TC de base, du prix du zinc de base et des coefficients de variation.

Globalement, on constate que la TC réalisée conditionne un grand nombre d'éléments négociés du contrat du concentré. Le prix du zinc est également impliqué dans plusieurs relations causales avec les variables négociées annuellement. D'un côté il existe une relation de causalité entre le prix du zinc et le prix du zinc de base, de l'autre côté il existe également une relation de causalité entre le prix du zinc et la TC de base. La causalité entre le prix du zinc de base et la TC de base est existante, mais faible.

Ceci indique que la TC de base est bien le principal déterminant de la TC réalisée. Lors des négociations, les mineurs et les transformateurs utilisent l'ensemble de l'information disponible via la formule de valorisation du concentré et ses sous-composantes. Ils n'accordent pas de poids particulier au prix du métal au détriment de la TC de base. C'est donc bien la part négociée de la valorisation, soit la TC, qui est au coeur de ce réseau de variables. Cette TC de base renégociée sert à son tour de "base" pour la TC réalisée de l'année suivante, perpétuant le cycle et expliquant la Granger-causalité de la TC réalisée vers la TC de base.

Cette revue des corrélations entre les différentes variables du contrat de concentré, autour des deux variables fondamentales (TC et prix du zinc) nous indique clairement que notre test de l'hypothèse 1 à l'aide du modèle Cobweb doit reposer sur deux séries, la TC de base et la TC réalisée en raison des considérations suivantes :

- La TC de base et le prix du zinc déterminent la TC réalisée de part la formule de calcul. A son tour, la TC réalisée impacte les autres variables du contrat de concentré. La TC réalisée l'année précédente influence sur le niveau de la TC de base l'année suivante. Conformément à notre modèle analytique, la TC réalisée reflète de par son contenu informationnel, un aspect de l'équilibre sur le marché du concentré.

- L'absence de lien, testée selon différentes procédures, entre TC de base et prix du métal, accrédite l'idée que les variation de ces séries peuvent être simultanées ou décalées, synchrones ou asynchrones. Nous savons que le prix du métal joue un rôle dans l'équilibre du mineur, il nous faut donc tester la variable TC de base pour l'équilibre du marché du concentré et la variable TC réalisée qui replète mieux la position des mineurs. Il y a complémentarité entre ces deux observations et non équivalence.

Ces conclusions sont cohérentes avec les résultats de Bruneau et Nicolai (1991) dans le cadre du marché du pétrole brut et raffiné. Ceci conclut notre analyse des relations entre la TC de base, la TC réalisée et le prix du métal. Nous allons maintenant appliquer le modèle Cobweb aux deux variables de la TC (de base et réalisée) pour obtenir une réponse quant à la validation de l'hypothèse 2.

III.1.3 Le modèle Cobweb appliqué à la TC

Nous procédons d'abord à l'identification du processus statistique à l'origine des variations de la série historique de la TC de base et de la TC réalisée. Il s'agit de démontrer que la TC satisfait empiriquement les caractéristiques d'un prix. L'identification du comportement

de la TC en tant que processus de prix de type *Cobweb* permettrait de conclure que *de facto* elle se comporte comme un prix de marché (ou comme un benchmark convergent). Ce travail d'identification est fait non pas dans un but de prévision, mais uniquement dans une perspective de comparaison avec les processus de prix existants.

La transcription empirique des fonctions de (Friedman1979) est donnée par un processus AR(1), convergent vers un niveau d'équilibre à long terme. Il s'agit de l'observation classique du modèle Cobweb (Ezekiel, 1938) où la variable de prix est une série I(1), intégrée d'ordre 1. Le modèle Cobweb permet de caractériser les décisions des firmes basées sur les prix passés récents.

Le modèle Cobweb de l'offre et de la demande suppose que l'offre de produit dépend d'un processus de production long. Ainsi, la demande s'ajuste immédiatement aux variations de prix, alors que l'offre s'ajuste avec une période de retard. Cela correspond sur le plan théorique à des anticipations adaptatives, comme nous l'avons rappelé en section 1. La transcription statistique de nos fonctions d'offre et de demande est :

$$SC_t = a_0 + a_1 P_t + \epsilon_{s,t} \quad \text{avec} \quad a_1 < 0 \tag{2.36}$$

$$DC_t = b_0 + b_1 P_{t-1} + \epsilon_{d,t} \quad \text{avec} \quad b_1 > 0 \tag{2.37}$$

En situation d'équilibre, l'égalité de l'offre et de la demande permet d'obtenir l'expression du prix P_t :

$$P_t = \delta_0 + \delta_1 P_{t-1} + \epsilon_t \tag{2.38}$$

L'expression de prix ainsi obtenue indique que la variable de prix se comporte comme un processus AR(1). Il s'agit d'une hypothèse assez restrictive qui ne tient pas compte des comportements plus diversifiés de la série de prix, notamment sous l'influence d'autres facteurs que le prix passé. Néanmoins, la vérification du comportement de la TC en tant que AR(1) constitue, du fait des tests que nous avons effectués précédemment, une garantie suffisante de la validation de l'hypothèse 2.

Nous disposons de données annuelles pour les composantes du contrat de concentré pour la période de 1975 à 2014 issues de la base de données de Wood Mackenzie - Brook Hunt (2012). Cette base de données est privée. Les analystes de Wood Mackenzie l'alimentent avec des données qui ne sont pas disponibles dans la sphère publique, ce qui lui confère un caractère unique et justifie un accès payant. Suite à plusieurs rendez-vous avec les équipes de Wood Mackenzie, nous avons obtenu un accès gratuit exceptionnel à ces données. En échange, notre usage de ces données doit être limité aux travaux entrepris dans le cadre de cette thèse et ne

peut donner lieu à une publication exhaustive et explicite de la base dans la sphère publique.

La modélisation est faite sur deux séries de données : TC de base (annuelle) et TC spot ou réalisée (journalière). En utilisant les données sur les prix journaliers LME du zinc nous construisons une série de la TC réalisée à partir des données historiques sur la TC et le prix du zinc. La TC spot se compose de la TC de base et de la différence entre le prix du métal spot et le prix du métal de base à laquelle on applique les coefficients de variation *Scale* : $TC_{spot} = TC_{base} + (PZn - PZnB) * Scale)$.

L'application de la méthode de Box et Jenkins[24]. Les modèles ARIMA (Autoregressive Moving Average) sont une forme générale de modèles combinant les processus autoregressifs, les processus intégrés et les moyennes mobiles. La forme générale du processus ARIMA est ARIMA(p, d, q) avec p le nombre de termes autorégressifs, d le nombre de différences et q le nombre de moyennes mobiles[25]. Nous pouvons ainsi caractériser la TC spot comme un processus autoregressif d'ordre 1 de type ARIMA (1,0,0) ou ARMA (1,0)[26]. Ce processu peut être exprimé ainsi :

$$TCSpot_t = 0,99TCSpot_{t-1} + 214,82 + \epsilon_t \tag{2.39}$$

La valeur du coefficient 'delta' est proche de 1, ce qui traduit une très lente vitesse de convergence de la série vers la moyenne. Ce résultat permet de valider l'hypothèse 2 pour la TC spot, car le coefficient a correspond au paramètre δ_1 du modèle Cobweb.

Nous répétons la procédure de test pour la série de la TC de base est concluons que cette série contient un processus autoregressif et ne contient pas de processus de moyenne mobile. Nous obtenons, au terme de notre procédure, un processus de type ARIMA (2,1,0) sans constante[27] avec les coefficients suivants :

$$DTC_t = -0.26DTC_{t-1} - 0.41DTC_{t-2} + \epsilon_t \tag{2.40}$$

Avec DTC la différence première de la TC de base.

Le modèle AR(2) est convergent à la moyenne dans certains cas de figure [28], mais cette

[24] La méthodologie Box et Jenkins (1970), permet d'identifier le type d'un processus qui subit un certain nombre de chocs aléatoires sur la période de l'observation

[25] Formellement : $y_t = a * y_{t-1} + \epsilon_t$.

[26] Voir annexe E pour une présentation détaillé de la procédure.

[27] $y_t = y_{t-1} + a_1(y_{t-1} - y_{t-2}) + a_2(y_{t-2} - y_{t-3}) + \epsilon_t$ avec a_1 et a_2 les coefficients associés aux termes autoregressifs du modèle.

[28] Lorsque l'expression $((a_1)^2 + 4a_2)$ est supérieure à 0, les processus AR(2) ont des propriétés en terme de convergence similaires aux processus AR(1).

propriété n'est pas vérifiée pour notre modèle de la TC de base.

La TC de base affiche un comportement pseudo-périodique traduisant un caractère cyclique. Une série périodique se caractérise par l'existence de cycles de même périodicité. Une série pseudo-périodique a également un comportement cyclique, mais le processus ne se reproduit pas à l'identique en raison de la présence d'un facteur d'amortissement ; le cycle se trouve ainsi décalé de quelques périodes. Le caractère cyclique des prix de matière premières est un phénomène largement documenté (Lonoff, 1981, Chatrath *et al.*, 2002, Cuddington et Jerrett, 2011), de même que l'existence des Cobweb sur ce type de séries (Anokye et Oduro, 2013). Cashin *et al.* (2002) obtiennent une forte cyclicité des prix pour 36 matières premières. Deaton et Laroque (1992) observent eux une forte autocorrélation des prix des matières premières d'une année à une autre.

Nos résultats s'inscrivent dans cette tradition, et justifient le traitement de la TC comme un véritable "prix de matières premières". Analytiquement, la TC peut être intégrée en tant que prix dans les programmes de production des firmes et conduire à une situation Pareto-optimale. Empiriquement, l'analyse de la série TC ne rejette pas l'existence d'un équilibre de long terme vers lequel tendrait la TC. Nous pouvons donc considérer l'hypothèse 2 comme validée avec un certain nombre de réserves. Nous retenons donc tout d'abord que la TC peut être conceptualisée comme un véritable *prix du concentré*, vision analytique confirmée par le comportement empirique des séries de la TC.

Nous n'oublions cependant pas le cadre méthodologique qui conditionne ce résultat et les réserves associées à la validation empirique de notre hypothèse. Nous avons constaté dans la section I que l'équilibre de concurrence pure et parfaite était instable et reposait sur la diffusion totale de l'information sur les plans de production des mineurs et des transformateurs : sans cela le mineur ne peut proposer une TC qui corresponde au coût marginal du transformateur et il doit demander un prix supérieur à son coût marginal. Nous avons également débattu des conséquences de ce résultat dans un contexte d'anticipations adaptatives.

Nous retrouvons ce résultat dans l'étude des propriétés de la TC de base, qui est *annuelle*. La TC de base a une inertie importante, qui est à la fois le résultat des difficultés inhérentes à la formation d'anticipations rationnelles (qui deviennent le plus souvent au mieux adaptatives) et du rôle des variables "inertielles" du contrat de concentré omises dans la régression du fait de leur caractère exogène par rapport à l'équilibre. On observe, néanmoins, une validation sans accrocs de l'hypothèse 2 pour la TC réalisée et *journalière* où le prix du métal est modélisé. Le rythme de convergence reste cependant assez lent.

Cette propriété est illustrée par les niveaux de la TC entre 2013 et 2015. La valeur de la TC de base appliquée aux contrats de 2015 est de 245 $/tonne de concentré associée à un prix du zinc de base de 2000 $/tonne. Ce niveau de la TC est supérieur à celui de 2014 où la TC de base était de 223 $/t pour le même prix du zinc de base. La TC de base en 2013 et en 2012 a été également associée au prix de zinc de base de 2000 $/t et s'établissait respectivement à 210.5 $/t et 191 $/t. Donc, depuis quatre ans, le niveau de la TC de base croit tout en étant associé au même niveau de prix du zinc de base.

Nous pouvons donc décrire le marché du concentré à la lumière de l'hypothèse 2 de la façon suivante. Le marché du concentré est un marché qui peut être décrit comme concurrentiel et où la variable de prix a un contenu en information suffisant pour assurer une convergence, quoique lente, vers un point d'équilibre de long terme. Néanmoins, cet équilibre est extrêmement instable du fait des ajustements permanents causés par la dispersion géographique de la production, l'hétérogénéité du bien considéré et les besoins en coordination de la filière. Ceci rend plus probable l'existence d'un équilibre local au sein d'un cycle de production plus général, conditionné par l'investissement et la demande finale.

L'équilibre sur le marché dans un contexte concurrentiel est donc au mieux une cible mouvante rarement atteinte, au pire un objectif inatteignable. Comme nous l'avons souligné, rendre cet objectif atteignable reviendrait probablement à modifier profondément le mode de détermination de la TC, jusqu'à en faire un prix de référence come les autres. C'est le souhait de certains acteurs de marché, comme nous le montrerons dans le chapitre 3. Avant d'analyser plus avant cette vision globale des acteurs du marché et de synthétiser les enseignements fournis par nos deux hypothèses de travail, nous proposons pour conclure ce chapitre les avis des industriels sur la dimension concurrentielle de la TC.

III.2 La TC en tant que prix : quel sentiment de marché ?

Le test de l'hypothèse 2 sur l'identification de la TC en tant que prix a été réalisé en deux étapes : validation théorique et validation empirique. Alors que les résultats théoriques valident l'hypothèse 2, l'étude empirique fournit une conclusion plus nuancée en fonction du type de TC considérée. Nous proposons donc de soumettre cette hypothèse au jugement des acteurs du marché. La validation de l'hypothèse 2 est supportée par les avis des industriels que nous avons interrogés dans le cadre de notre travail. Cependant, malgré un usage opérationnel, *de facto*, de la TC comme variable de prix, elle ne peut pas être reconnue comme telle en raison d'obstacles organisationnels. Les mineurs sont davantage enclins à utiliser une TC prix, alors que les transformateurs refusent cet usage lui préférant le calcul de la TC indexée sur le prix

du métal.

III.2.1 La TC vue par les firmes de la filière

Nous présentons ici un extrait des données de l'enquête réalisée auprès des firmes impliquées dans les transactions sur le concentré[29]. L'un des objectifs du questionnaire est de déterminer l'importance de la TC pour les intervenants directs. Les résultats obtenus montrent que la TC est considérée comme importante par 91% des personnes interrogées. Ces personnes interrogées ont attribué une note de 7 à 10 sur une échelle de 1 à 10 à l'importance de la TC (10 étant «très important»).

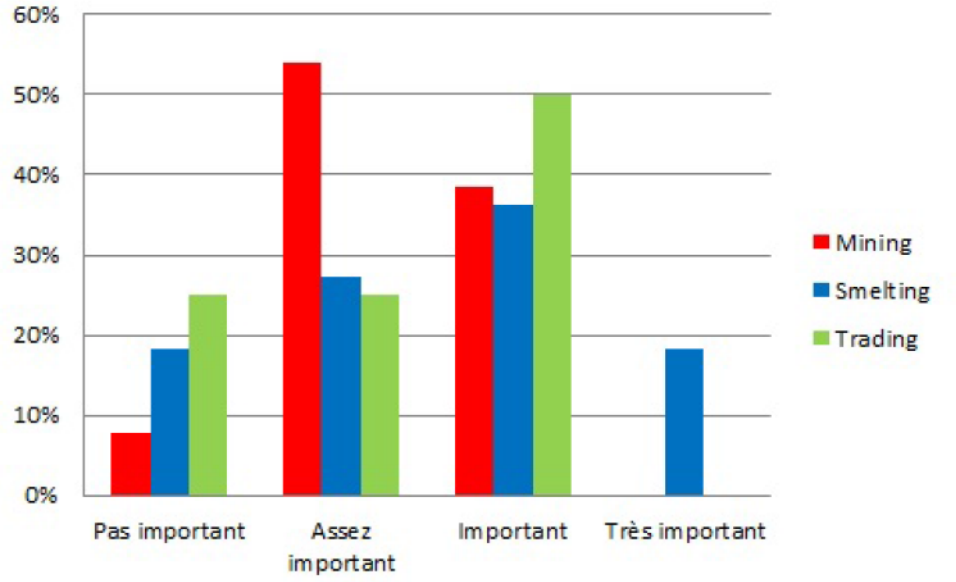
Nous avons également demandé aux personnes interrogées de noter leur perception du niveau de la TC en 2012 sur une échelle de 1 à 10. La TC obtient une note de 5 à 8 de la part de 82% des firmes, ce qui appelle deux commentaires quant à la perception de la TC. Premièrement, toutes les personnes interrogées ont une idée du niveau de la TC et sont capables d'évaluer ce niveau. Deuxièmement, les firmes, indépendamment de leur activité, identifient le niveau de la TC de la même manière : il existe un consensus sur le marché par rapport au niveau de la TC. Nous constatons donc un accord global autour du rôle de la TC comme vecteur d'informations à usage opérationnel.

Compte tenu de ce rôle, il faut s'intéresser plus avant à l'impact de la TC sur les pertes et profits des firmes auxquelles appartiennent les personnes interrogées (graphique 2.13). On note que l'impact de la TC sur les pertes et profits des mineurs est difficile à identifier (il varie de «pas important» à «important»). Ceci renvoie au rôle du prix du métal dans notre modélisation (section II) et à l'importance des catégories de firmes. A priori, ce résultat s'explique par les différences en contenu métallique du concentré : la TC aura un impact faible sur le profit des mineurs lorsque le contenu métallique est élevé et inversement, son impact sera important pour un contenu métallique bas.

Les réponses des mineurs sont également dispersées sur le sujet suivant, avec environ 50% des mineurs interrogés déclarant que la TC est moins importante que le prix du métal. Néanmoins, les valeurs extrêmes sont très importantes avec plus de 20% des firmes interrogées déclarant que la TC est aussi importante que le prix du métal et 20% indiquant une absence d'importance de la TC par rapport au prix du métal. Ces réponses sont à mettre en lien avec la question relative à l'impact de la TC sur les pertes et profits des firmes et des contraintes du mineur évoqués dans la section I.2. Paradoxalement, la TC est plus importante que le prix du métal

[29]La méthode de collecte des données, la construction du questionnaire et les résultats détaillés sont présentés dans le chapitre 3. Seules les questions concernant l'hypothèse 2 sont détaillés ici.

Graphique 2.13: L'importance de la TC sur le résultat des firmes



Source : Auteur

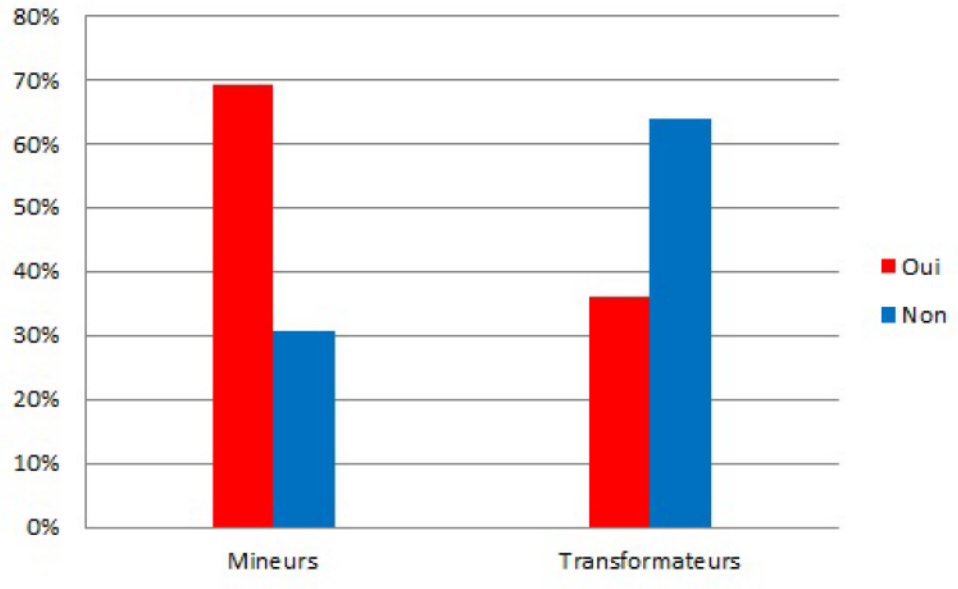
même pour les mineurs dont les pertes et profits sont peu affectées par la TC.

S'agissant des transformateurs, nous trouvons ici deux catégories des firmes : celles dont les résultats dépendent fortement de la TC et celles qui sont relativement moins touchées. Ce résultat est assez intéressant car il traduit un vrai clivage au sein des transformateurs même si la taille de ces catégories est à mettre en évidence. 18% des transformateurs qui déclarent que la TC n'affecte pas leurs profits semblent ne pas être affectés par la volatilité de la TC. Selon nous, il s'agit des transformateurs fonctionnant en tolling, ce qui explique leurs réponses. Le partage des réponses entre les options 'assez important' et 'important' traduit les différences de la sensibilité des transformateurs au phénomène de la TC et introduit un deuxième clivage au sein des transformateurs. Nous explorons ces clivages plus en détail dans la section I.

Ainsi, l'impact de la TC sur le résultat des firmes la met au même niveau que le prix du métal parmi les variables opérationnelles de gestion. Le niveau de la TC est connu par les firmes qui participent directement aux négociations et qui font une veille du marché. Alors que la TC semble être très importante pour les transformateurs, les mineurs semblent s'intéresser non seulement à la TC, mais également au prix du métal ce qui est en conformité avec les postulats de notre modèle théorique.

Les firmes surveillent les variations de la TC et identifient bien les variables qui sont à l'origine de ses variations. Nous notons que les variables affectant l'équilibre quantitatif (l'offre, la demande, le stock du concentré) sont considérées comme les principaux facteurs de l'évolution

Graphique 2.14: Négociez vous la TC contrat par contrat ?



Source : Auteur

de la TC, loin devant le prix du métal (graphique 1.16, chapitre 1, section III.1). Ce constat appuie nos conclusions sur l'identification clair d'un marché du concentré, en tant que marché organisé gardant les liens avec le marché du métal.

La TC n'est pas utilisée de la même manière par les firmes selon leur activité (graphique 2.14). Il apparaît clairement que la majorité des mineurs souhaite avoir une TC flexible, privilégiant une négociation pour chaque contrat. A l'inverse, la plupart des transformateurs se prononce pour l'utilisation de la TC de base s'appliquant à toutes les transactions. Le rôle au sein de la filière est clairement clivant sur cette question.

Les réponses au questionnaire nous confirment que les firmes perçoivent la TC à la fois en tant que source d'information et comme variable d'incitation. Ces réponses sont donc conformes aux les fonctions d'un prix identifiées dans la section I. Nous pouvons également confirmer que chacun voit en la TC la version du prix la plus proche des besoins de son propre programme de maximisation. Les mineurs se réfèrent ainsi plus facilement à la TC réalisée (qui contient des informations sur le prix du métal) alors que les transformateurs sont attachés à la TC de base. Ce constat traduit une certaine instabilité de l'organisation de la filière.

III.2.2 Une transition vers un véritable prix du concentré ?

Les acteurs sont donc partagés sur l'évolution de la TC vers un prix de marché, une situation compliquée par le fait que les mineurs et les transformateurs ne se réfèrent en fait pas au même "prix". Nous concluons donc ce chapitre par un commentaire sur les évolutions à attendre de la mise en place d'un véritable prix du concentré. Nous proposons ce travail prospectif en partant de l'hypothèse que la TC serait abrogée et remplacée par un marché organisé du concentré de zinc, probablement par grade de contenu en métal.

Aujourd'hui, le revenu du transformateur est complété par le revenu de la vente des produits annexes. L'utilisation d'un prix éliminerait ce système de rémunération du transformateur, ce qui se traduirait par une augmentation immédiate de ce prix par rapport à l'ancien niveau de la TC *ceteris paribus*. Cette hausse s'accompagnerait d'une redéfinition du contrat de concentré, basé uniquement sur le contenu en métal, à charge au transformateur de valoriser les autres composants comme il l'entend.

De nombreuses firmes seraient probablement éliminées du marché si un prix du concentré est appliqué, et ce malgré une hausse probable de ce prix. En effet, le système actuel entretient une forte hétérogénéité dans l'offre de transformation, qui reflète à la fois l'hétérogénéité de la demande finale et celle des concentrés. Un prix unique, même par type de concentré, favoriserait les transformateurs les plus importants pouvant compter sur leurs économies d'échelles et réduirait probablement la versatilité de l'offre de transformation.

L'utilisation de la TC prix va créer une différenciation des transformateurs selon les deux critères : le taux de recouvrement et le prix de la transformation. Les mineurs chercheront à vendre le concentré aux transformateurs ayant un meilleur taux de recouvrement, car ils pourront valoriser le maximum des métaux contenus. Ils chercheront en même temps un prix de la transformation moins élevé. Les transformateurs avec le ratio taux de recouvrement/prix de la transformation le plus intéressant seront ceux qui pourront gagner le plus de ce changement.

Les mineurs seront moins affectés, car la TC correspond à un coût parmi d'autres supportés par les mineurs. De cette manière, l'utilisation de la TC prix profiterait davantage aux mineurs en éliminant les règles de partage des profits qui existent entre les deux types de firmes. L'allocation des ressources deviendrait plus efficace en raison de la nécessité d'améliorer le processus de transformation et d'incitation pour les mineurs à produire un concentré plus riche pour ainsi limiter les pertes lors de la production et de la transformation.

Nous pouvons donc attendre de la mise en place d'un prix une standardisation des concentrés échangés et une augmentation des volumes individuels de la production de part et d'autre du

marché. Ici, la nature instable de l'équilibre de concurrence pure et parfaite devient évidente : son aboutissement est en fait nécessairement un renforcement de l'oligopole bilatéral, ce qui nous ramènerait au cadre de l'hypothèse 1. Une première conséquence de long terme de la mise en place d'un prix est donc la probable formation d'une entente autour du prix, mettant fin à la CPP.

Pour que la concurrence persiste, il faudrait que l'ouverture du marché incite de nouveaux opérateurs à se positionner sur des segments particuliers du marché, avec des volumes faibles, où les économies d'échelle jouent peu (typiquement, les concentrés à faible contenu métallique). La CPP dériverait alors naturellement vers la concurrence monopolistique. Une autre issue probable si l'entente sur le prix échoue, serait la formation de conglomérats mineurs/transformateurs, ce qui a terme reviendrait à faire disparaitre le marché du concentré par une intégration parfaite.

Ces éléments d'évolution structurelle montrent bien la fragilité de l'équilibre de CPP pour une filière comme celle de la production du zinc. A ces obstacles s'ajoutent les objections déjà mentionnées dans ce chapitre et le précédent. Tout d'abord, un prix suppose une baisse des profits globaux, principalement du côté des transformateurs. Certains peuvent voir leurs profits augmenter à court terme, mais sur le long terme le marché est globalement perdant. La mise en place d'un prix suppose donc une faillite de l'entente actuelle, exemplifiée par les négociations.

La mise en place d'un prix renforcerait encore la tendance actuelle au court termisme et rendrait difficile la conclusion des contrats de long terme. Les firmes auront du mal à s'engager sur la durée avec un prix inconnu sans mécanismes clairs d'indexation ni de couverture. C'est surtout vrai en ce qui concerne les transformateurs pour qui la TC présenterait la seule source de revenu.

Le risque de dénonciation des contrats va augmenter, car les firmes opportunistes chercheront à faire un arbitrage permanent entre le prix du contrat conclu et le prix observé sur le marché. Les renégociations des contrats vont devenir plus fréquentes, associées à l'augmentation du nombre de contrats spot. Le nombre de contrats spot est déjà en croissance, même si aujourd'hui ils correspondent à une faible proportion des contrats conclus en termes de volume du concentré. La généralisation des contrats spots est impossible en raison de l'importance des coûts fixes et de la flexibilité insuffisante du procédé technique de transformation du zinc.

L'usage d'un prix du concentré pose finalement la question de la gestion du risque de prix qui y est associé. L'utilisation de la TC benchmark indexée sur le prix du métal permet aux firmes de mettre en place des stratégies de couverture pour gérer partiellement le risque de la TC. L'utilisation d'un prix ne pourrait plus fournir cette option aux firmes. Il faudrait alors attendre

la mise en place d'instruments de couverture, ce qui ouvre une large palettes de problèmes lié à leur coût potentiel et aux risque de les voir détournés dans des stratégies de placement n'ayant pas de rapport avec les besoins de la filière.

La mise en place d'un marché organisé avec un prix du concentré cloisonnerait les marchés du concentré et du zinc métal de façon formelle, avec pour conséquence le renforcement des barrières à l'entrée en raison d'une uniformisation du concentré échangé. Ce cloisonnement des marchés, associé à la généralisation des contrats spot, créera une forte demande pour de nouveaux acteurs qui vont remplir la mission de coordination des échanges et supporter les nouveaux risques financiers. Il peut s'agit de négociants, de grossistes en concentré ou bien des intermédiaires physiques et financiers. Il peut simplement s'agir d'un agent économique disposant de la surface financière nécessaire à l'exercice.

Il n'est pas certain, comme dans l'exemple des instruments de couverture, que ces agents auront principalement à cœur la pérennité de la filière et la garantie des approvisionnements en zinc. Dans le chapitre suivant, nous reprenons ces différents scénarios découlant de l'hypothèse 2 et les confrontons avec les conséquences découlant de l'hypothèse 1. Ceci nous permet de proposer des scénarios complets d'évolution de la filière dans un future proche et de juger des évolutions à venir de la TC.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons testé l'hypothèse 2 selon laquelle la TC correspond à une variable de prix dans les échanges du concentré. La validation de cette hypothèse a été réalisée en deux étapes : validation théorique puis empirique. Nous avons d'abord cherché à définir un cadre conceptuel cohérent pour tester l'hypothèse 2 dans un cadre concurrentiel. Dans la section I, nous avons analysé les fonctions d'un prix, avant de sélectionner la TC comme le meilleur candidat au rôle de prix du marché de concentré. Nous avons ensuite proposé une estimation des valeurs à attendre pour la TC, compte tenu des spécificités de la filière du zinc.

Dans la section II, nous utilisons la formulation théorique de la section précédente pour proposer un modèle analytique permettant de définir une TC optimale. Nous proposons ensuite une version calibrée de ce modèle pour étudier différentes configuration concernant la TC, le prix du métal, le taux de recouvrement et autres variables d'intérêt.

Dans la section III enfin, nous avons réalisé une étude des propriétés de la série historique de la TC. Nous avons identifié le processus à l'origine de la variation de la TC et nous avons

comparé ce résultat avec la modélisation du prix tendant vers un équilibre de long terme dans le cadre du modèle Cobweb. Sur la base de cette étude empirique, nous avons conclu que la TC spot peut être validée en tant que variable de prix ; la validation de la TC de base est partielle. L'hypothèse 2 est donc invalidée au sens strict sur le long/très long terme, mais peu convenir à une analyse de court moyen terme dans un contexte stable.

Le premier apport de ce travail concerne l'identification du marché du concentré en tant que marché indépendant. Le marché du concentré est lié à celui du métal compte tenu du positionnement du transformateur au sein de la filière. L'utilisation des deux variables de prix distinctes permet de justifier la séparation théorique des deux marchés. L'offre et la demande de concentré peuvent être modélisées en tant que fonctions de la TC. Par conséquent, on peut identifier une TC d'équilibre permettant d'égaliser l'offre et la demande du concentré. La TC est l'unique référence de prix publiquement disponible sur le marché du concentré et elle peut être considérée en tant que prix notamment de par son rôle de coordination des échanges.

Notre modélisation apporte un nouveau regard sur les variables à l'origine de la variation de la TC. Nous identifions les impacts positifs des variables de l'offre de concentré sur la TC ainsi que des variables de la demande de métal. Les variables de la demande de concentré affectent négativement la TC, ce qui est également conforme à nos prévisions. En revanche, l'impossibilité de se prononcer sur le lien entre la TC et le contenu métallique pose un point de discussion sur les décisions économiques liées à l'amélioration de celui-ci. Si l'amélioration du contenu métallique affecte positivement la TC, les mineurs n'ont pas intérêt à optimiser leurs opérations pour produire le concentré "plus pur". Dans le cas où l'impact de l'amélioration du contenu métallique sur la TC passe du positif au négatif, on parlerait d'existence d'une valeur seuil du contenu métallique à partir de laquelle l'amélioration du contenu métallique devient intéressante pour les mineurs. Donc, les mineurs auront intérêt à augmenter le contenu métallique au delà de cette valeur seuil pour bénéficier d'une TC plus basse.

Nous avons également identifié le niveau de production optimal du transformateur et du mineur. Pour le transformateur, il s'agit d'un niveau de production égalisant le coût marginal de production à la TC ; pour le mineur il s'agit d'un niveau égalisant le prix du métal à la somme du coût marginal de production et la TC pondérés par le contenu métallique. Le mineur et le transformateurs ne produisent que si l'activité de production est rentable. A court terme et dans les conditions de la CPP, la libre entrée des firmes sur le marché conditionne l'absence du profit des firmes. Néanmoins, à long terme, les firmes peuvent bénéficier du profit économique résiduel en raison de l'existence d'un phénomène de rente leurs procurant l'avantage en termes des coûts. Cette rente peut être justifiée par le choix de la localisation des transformateurs ou par certaines techniques d'extraction minière.

Seuls les mineurs et les transformateurs efficaces restent sur le marché à long terme. Par ailleurs, ils choisissent la technologie de production la plus efficace leur permettant d'obtenir le coût marginal le plus bas. Cette conclusion est critiquable en raison du caractère uniforme de la technologie utilisée, car à long terme les firmes n'ont pas intérêt à investir dans une technologie plus efficace si les autres firmes du marché font de même.

Les propriétés statistiques de la TC spot témoignent d'un processus convergent vers un équilibre de long terme, ce qui correspond à l'observation classique du modèle Cobweb. La TC spot se comporte comme une variable de prix avec une lente convergence vers sa valeur d'équilibre de long terme. Cette conclusion est conforme aux contraintes de production des firmes traduisant un processus de production avec un long temps d'ajustement. Une remarque particulière s'impose quant à l'absence de convergence vers un équilibre de la TC de base. Nos conclusions tendent à démontrer le caractère cyclique de la TC de base avec des cycles régulièrement décalés. Cette conclusion est en ligne avec le fonctionnement de la filière. Or, le faible nombre d'observations utilisées dans notre analyse peut compromettre la solidité de nos résultats. Il ne nous a pas été possible d'améliorer ce point critique en raison de la fréquence annuelle de la TC de base. Pour cette raison, les résultats de l'étude empirique de la TC de base ne constituent pas une preuve en soi, mais confirme dans l'ensemble notre argumentaire sur l'hypothèse 2.

Sur un marché aussi particulier que le concentré de zinc, l'hypothèse de la concurrence peut sembler irréaliste. Elle nous a cependant fournie de nombreux enseignements. Le plus important d'entre eux est sans doute le caractère profondément instable de l'équilibre de concurrence pure et parfaite. La mise en place d'une TC prix ouvrirait potentiellement sur une phase de concurrence accrue et une hausse de l'efficacité des agents survivants. Mais à moyen terme, la filière aurait le choix entre basculer vers la concurrence monopolistique et de fortes incertitudes concernant les approvisionnements, ou un retour à une coordination voire une entente avant potentiellement une intégration juridique mineurs/transformateurs.

Nous estimons que l'utilisation actuelle de la TC convient à la filière pour plusieurs raisons telles que la gestion des flux physiques, la réduction de l'incertitude, l'obtention du profit non nul et la répartition du pouvoir du marché. L'évolution de la TC vers une variable de prix est cependant désirée par certains agents et passe par une modification du rapport de force entre les firmes de la filière. Dans le chapitre suivant, nous proposons donc des perspectives d'évolution de la filière, centrée sur les évolutions liées de la TC.

Chapitre 3

Rôle, variations et futur de la TC

Sommaire

Introduction **169**

I La filière de zinc : un système dynamique en équilibre instable **172**

I.1 La TC et l'équilibre de la filière 173

I.2 Equilibre de la filière : chocs passés et canaux de transmission 182

II Evolutions de la TC : anticipations et scénarios futurs **191**

II.1 Niveau et variations de la TC : la perception des acteurs 192

II.2 Les évolutions à venir de la TC et du contrat de concentré 211

II.3 Les évolutions de l'environnement productif et financier 223

III Prospective pour la filière du zinc **233**

III.1 Stratégies d'avenir : coopération ou passager clandestin ? 235

III.2 L'apparition de nouveaux acteurs 242

Introduction

"The validity of a hypothesis in this sense is not by itself a sufficient criterion for choosing among alternative hypothesis. Observed facts are necessarily finite in number ; possible hypotheses, infinite. If there is one hypothesis that is consistent with available evidence, there are always an infinite number that are."

Milton Friedman, 1953

DANS les deux chapitre précédents, nous avons proposé deux hypothèses quant au rôle de la TC au sein de la filière de zinc. L'hypothèse 1 postulait la TC comme un instrument de coordination d'un l'oligopole non-intégré verticalement tandis que l'hypothèse 2 étudiait la pertinence de la TC comme un prix dans un cadre de concurrence non faussée. Notre stratégie de test ne nous a pas permis de départager ces deux hypothèses. Bien que théoriquement mutuellement exclusives, les deux hypothèses proposent en fait des explications complémentaires de la réalité.

A partir des cinq contraintes pesant sur la filière du zinc[1] il ressort de notre étude que la TC joue un rôle similaire dans le cadre des deux hypothèses : elle permet d'allouer les ressources entre mineurs et transformateurs pour faire face à ces contraintes. Les propriétés de la TC sont déterminés par ces cinq contraintes de production. Le niveau de la TC est fonction des décisions sur le partage du profit. Ce partage du profit détermine à son tour le partage du pouvoir de marché et, à terme, l'organisation de la filière et sa structure (concurrence/oligopole/monopole). Notre étude des hypothèses 1 et 2 sur la nature de la TC a donc fait ressortir les liens entre la structure de la filière, le partage des profits et la TC. La stabilité de l'organisation de la filière réside dans l'équilibre entre ces trois variables. Une instabilité importante ou une modification de l'un de ces trois variables impliquerait un changement des deux autres. Ce constat nous amène à nous interroger sur les évolutions de cette relation.

La problématique de ce chapitre est axée sur le lien entre la structure de la filière et le rôle de la TC défini par cette structure. En quoi le maintien de la TC est-il justifié ? Est-ce que les évolutions récentes de la filière peuvent entraîner l'évolution de la TC ? Si la TC évolue, quel en sera le facteur déclencheur et à quel terme ? Les firmes de l'industrie sont-elles unanimes dans l'acceptation de la TC et de son rôle actuel ? Selon nous, deux types de facteurs peuvent être à l'origine de cette évolution dont nous distinguons la nature *endogène* ou *exogène* à la filière.

[1] Pour mémoire, ces cinq contraintes sont l'hétérogénéité des concentrés, la sécurité des approvisionnements, les coûts de main d'œuvre, les coûts d'énergie et les coûts de transports.

Les facteurs *endogènes*, regroupent l'ensemble des leviers d'actions placés sous le contrôle direct des firmes de la filière, de nature à modifier l'équilibre prévalent à un instant donné. Via les modèles développés dans les deux chapitres précédents, nous pouvons souligner le rôle du pouvoir de marchés de chaque acteurs, de l'exposition du transformateur au prix du métal, du maintien d'une capacité de transformation en volume, auxquelles s'ajoute la problématique plus traditionnelle de gestion des flux physiques entre les acteurs.

Les firmes de la filière sont disparates et la coordination entre elles dépend non seulement du rapport de forces entre les mineurs et les transformateurs, mais également des clivages internes autres que ceux relatifs au positionnement au sein de la filière. Afin d'identifier les canaux de transmissions des chocs entre les agents et les variables d'intérêts qu'ils actionnent (par exemple, le contenu métallique, les coûts de production), nous proposons un modèle en équilibre partiel de filière pour tester des scénarios actuels et prospectifs. Ces scénarios sont conçus à partir d'un questionnaire des acteurs de la filière, ce qui nous permet également d'évaluer nos conclusions à l'aune du sentiment de marché.

Les résultats du questionnaire sont traités à l'aide de l'analyse en composantes multiples (ACM) pour dégager les "profils types" des intervenants sur le marché. Le premier profil correspond aux acteurs dit "traditionnels". On y trouve les transformateurs et les mineurs satisfaits par la TC dans sa forme actuelle et dont l'activité ne s'éloigne pas de leur cœur du métier. Le second profil correspond aux firmes dites "diversifiées". On y trouve principalement les négociants et les firmes misant sur une diversification verticale et horizontale de leurs activités. Ces acteurs négocient activement la TC, utilisent des outils financiers pour bénéficier de l'évolution de la TC et souhaitent une TC plus proche d'un prix de marché. Le troisième profil regroupe des firmes très peu dépendantes de la TC, le profil "hétérodoxe". On y trouve principalement les transformateurs fonctionnant en *tolling* ou des transformateurs chinois qui n'appliquent pas la TC de base.

Ces trois groupes de firmes nous servent de grille de lecture pour appréhender les changements endogènes de la filière. Nous modélisons et estimons les impacts des évolutions souhaitées par les firmes afin d'en juger les conséquences. Ces simulations sont réalisées sur la base du modèle d'équilibre partiel présenté dans le chapitre 2, enrichi pour tenir compte des spécificités du contrat de concentré. Les acteurs souhaitent des évolutions sur la gestion de la volatilité de la TC, la fréquence des négociations et la part payable du métal dans le concentré. Trois scénarios sont proposés afin d'estimer l'impact des changements sur la TC, les variables du marché et les profits des firmes.

Les simulations font apparaître l'impact inégal des modifications sur le profit individuel des firmes permettant d'identifier les gagnants et les perdants. C'est la raison pour laquelle dans la plupart des cas, la volonté de changement d'un paramètre donné exprimé par un groupe de firmes rencontre l'opposition d'un autre groupe. Nous constatons que les évolutions demandées auraient un impact fort sur l'organisation de la filière, accentuant les clivages entre les groupes : gagnants et perdants sont inévitables, mais diffèrent selon les évolutions. Selon nous, l'inertie importante des firmes, l'absence de comportement stratégique du groupe et l'insuffisance du pouvoir de marché des firmes souhaitant ces évolutions sont les raisons de la stabilité du système actuel de valorisation du concentré. Néanmoins, l'impact des facteurs exogènes à la filière peut imposer des changements à la filière.

Ces éléments issus du "macrocosme" de la filière du zinc sont bien évidement fondamentaux pour la TC mais ils ne sont pas les seuls à prendre en compte pour estimer le niveau actuel et à venir de la TC. Des facteurs que nous classons comme *exogènes*, car hors de portée directe des acteurs, seront également déterminants pour la survie de la TC à moyen terme. Nous constatons que ces facteurs exogènes (épuisement des mines, rôle de la Chine, financiarisation des marchés des matières premières) «complexifient » le métier du mineur et du transformateur.

Les acteurs doivent faire face à de nouveaux défis d'approvisionnement, aussi bien en termes d'accès à long terme à la ressource brute que de gestion des contrats de court terme, et à de nouvelles contraintes règlementaires, environnementales et financières. Ces dynamiques exogènes peuvent accélérer le processus de l'évolution de la TC en raison de l'apparition de nouveaux risques et contraintes. Ainsi, l'organisation de la filière se trouvera modifiée par une complexification et une diversification des métiers des firmes au sein de la filière.

Ce constat nous amène à envisager un scénario d'évolution de la TC à moyen et long terme. Compte tenu des profils des firmes issus du questionnaire, peu d'entre elles vont se doter des moyens pour faire face à ces nouveaux défis ; elles vont préférer se concentrer sur leur métier de base. On assistera ainsi à l'apparition de nouveaux acteurs au sein de la filière, répondant aux besoins spécifiques (hedging, exploration, logistique). Ces acteurs vont également capter une part du profit anciennement partagé uniquement entre les mineurs et les transformateurs. Nous préconisons le renforcement de la coopération entre les firmes de la filière afin d'intégrer ces activités dans leur structure pour ainsi éviter la dépendance de ces nouveaux acteurs.

Dans ce chapitre nous explorons la stabilité du rôle actuel de la TC et les raisons de son évolution à moyen et long terme. Le devenir de la TC dépend des changements endogènes à la filière et des facteurs exogènes que nous identifions. En interne, nous constatons qu'il existe des divergences fortes entre les firmes sur la question d'une éventuelle évolution de la TC. La volonté de changement est motivée par un gain supplémentaire, mais qui ne profite qu'aux

firmes réclamant ces changements. En retour, l'insuffisance du pouvoir de marché de ces firmes fait perdurer le statu quo. A l'inverse, les facteurs exogènes témoignent d'évolutions déjà en marche et sont, à notre avis, précurseurs du changement du rôle de la TC vers une variable de prix.

Nous commençons ce chapitre par l'identification des liens entre la structure de la filière et l'utilisation de la TC actuelle. La synthèse des deux hypothèses sur la nature de la TC présentés dans les chapitres 1 et 2 sert de point de départ pour explorer les impacts des chocs passés et les canaux de transmission de ces chocs (section I). Les projections de l'évolution future de la TC font objet de la section II. A l'aide du questionnaire nous confirmons la non-homogénéité de la filière où les clivages entre les firmes reflètent leurs souhaits d'évolution de la TC et du contrat de concentré (émanant des groupes de firmes identifiées). Malgré les divisions au sein de la filière, aucun groupe de firmes ne dispose de pouvoir de marché suffisant pour imposer une évolution de la TC. Ceci nous amène à considérer les dynamiques exogènes en tant que véhicules d'une éventuelle modification de la TC et de la structure de la filière. Nous concluons ce chapitre par les préconisations concernant l'évolution de la TC (section III).

I La filière de zinc : un système dynamique en équilibre instable

Selon nous, la TC correspond à un indicateur de la structure de marché et assure la pérennité d'un cadre hybride de concurrence au sein de l'oligopole de la filière. Nous estimons sur la base de ce constat que la TC est maintenue inchangée en raison de la stabilité du rapport de force au sein de la filière. Les agents considèrent la TC comme un prix ce qui permet de maintenir une dimension concurrentielle des échanges. Par ailleurs, le maintien de la TC permet de garantir une répartition des profits entre les firmes. Ce partage des profits est asymétrique, mais il reste suffisamment équilibré et avantageux en termes globaux pour garantir la pérennité de la TC et, ce faisant, la structure de marché.

Dans cette section nous étudions les évolutions de la filière qui peuvent être à l'origine de la variation de la TC. Nous détaillons les interactions entre la TC, le profit des firmes et la structure de la filière. Les évolutions exogènes et endogènes de la filière sont considérées comme facteurs potentiels de l'évolution de la structure et, par conséquent, de la TC. Les conséquences des chocs passés sont estimées et chiffrées à l'aide de l'application de notre modèle d'équilibre partiel. Selon nous, l'impact de ces chocs n'est pas assez fort pour provoquer des évolutions de la filière susceptibles de modifier la TC.

I.1 La TC et l'équilibre de la filière

I.1.1 La nature de la TC

Au travers de la modélisation de la TC entreprise dans les chapitres 1 et 2, nous avons démontré que la TC pouvait être considérée comme une variable d'équilibre technique (TC *benchmark*) ou bien en tant que prix de marché avec les propriétés d'équilibre associées (TC prix). Ce résultat, assez prévisible, témoigne d'un consensus de la filière issu des contraintes de production des firmes. Le besoin de coordination existant conditionne l'usage de la TC en tant que variable d'équilibre technique même si la TC en tant que prix apporterait plus de transparence et d'efficacité, ce qui est souhaitable du point de vue de l'optimum social.

Nous proposons dans cette section une synthèse des résultats des hypothèses 1 et 2 afin de juger de l'impact des évolutions possibles de la TC. L'identification des fonctions de la TC réalisée dans le cadre du test des deux hypothèses illustre comment la TC est liée à la structure de la filière de zinc.

Le test de l'hypothèse 1 a permis d'identifier la filière de zinc en tant que filière non-intégrée verticalement. Le besoin de coordination propre à ce type d'organisation nous a justifié l'introduction de la TC en tant que variable de coordination assurant l'obtention de l'équilibre technique de la filière. L'utilisation de la TC permet d'éviter la concurrence par les prix et par les quantités laissant les firmes harmoniser les flux entrants et sortants de matière.

Le souci de coordination qui anime les firmes de la filière est illustré à travers le mécanisme de partage du profit via la TC. Nous démontrons que la TC correspond à une variable consensuelle dont la valeur permet aux firmes de la filière d'obtenir un profit non nul et ainsi d'assurer un équilibre entre la quantité de concentré vendue et consommée. La dimension consensuelle de la TC va même plus loin, comme en témoignent les intervenants.

En raison des externalités de production ou de celles liées à une évolution du prix du métal, le niveau de la TC est ajusté afin de permettre aux firmes de se maintenir en activité. Les transformateurs acceptent une TC plus faible lorsque les mineurs souffrent d'un prix du métal bas. Les mineurs, à leur tour, s'assurent du niveau des capacités de transformation en accordant une TC plus élevée aux transformateurs lors des hausses du prix du métal. Ces accords sont complémentaires et indépendants de la dimension stratégique des négociations basées principalement sur l'équilibre quantitatif de la filière.

Dans cette perspective, l'étude de l'hypothèse 1 nous amène à constater que la TC aide à réduire l'incertitude des firmes en déterminant les quantités à produire et en assurant l'équilibre entre les quantités du concentré offertes et demandées. La dimension consensuelle de la TC permet également une bonne anticipation du niveau des profits à attendre pour les firmes de la filière. Le partage du profit réalisé à l'aide de la TC ainsi que l'existence même de la TC consensuelle témoignent de l'absence de domination d'un type de firmes sur le marché. Nous notons que les mineurs ont été légèrement favorisés lors du partage du profit, sans toutefois capter la totalité du profit à partager.

Cet équilibre entre égaux relatifs est maintenu par l'usage de la TC permet un ajustement quantitatif et une coopération, maintenant la structure de la filière en oligopole bilatéral. Inversement, cette structure, caractérisée par un fort besoin de coordination, nécessite la TC négociée afin d'assurer un fonctionnement acceptable à tous les acteurs de la filière. Il semble alors difficile d'imaginer une évolution an sein de la filière sans une modification/suppression de la TC.

Le travail dans le cadre de l'hypothèse 2 teste ce qui serait en fait une sortie de cette impasse par l'introduction de la concurrence. Nous posons des contraintes sur la structure de la filière et le fonctionnement des firmes, propres au cadre de modélisation en CPP, qui nous permettent de considérer la TC comme l'instrument de la concurrence, le prix. L'utilisation de la TC en tant que variable de prix nous permet de définir le marché du concentré, lieu virtuel des échanges du concentré.

Le travail de formalisation proposé dans le chapitre 2 nous permet de conclure que la TC est applicable en tant que prix pour l'échange du concentré. Cette conclusion est basée sur l'intégration de la TC dans la structure des coûts des mineurs et des transformateurs aboutissant à une situation Pareto optimale. Cette solution est souhaitable du point de vue de l'optimum social car elle satisfait les critères de l'allocation efficace des ressources.

La TC n'est validée que partiellement en tant que variable de prix sur ce marché. Alors que théoriquement l'utilisation de la TC en tant que prix satisfait les fonctions et l'usage du prix, nous aboutissons à une validation empirique incomplète. L'hypothèse 2 est validée pour la TC de court terme (TC réalisée), mais les résultats sont insatisfaisants lorsque nous analysons les variations de la TC sur le long terme (TC de base). De plus, ces résultats manquent de robustesse en raison du faible nombre d'observations (39 observations correspondant à la période 1975-2014). L'usage, parmi d'autres, du cadre de concurrence pure et parfaite constitue une limite forte à la portée des résultats.

Malgré les avantages associés à l'utilisation de la TC en tant que prix, cette situation nous paraît "inatteignable" et instable. La principale raison de l'impossibilité d'atteindre une optimalité du marché du concentré où la TC correspond à une variable de prix réside dans le caractère restrictif des hypothèses de la CPP. L'instabilité de cette solution provient des modifications profondes du tissu industriel de la filière qu'elle implique. L'utilisation de la TC en tant que prix permet d'éliminer du marché des firmes non efficaces. Le marché aura alors tendance à dériver vers un oligopole, voire une intégration verticale totale, faute de nouveaux entrants en raison des coûts fixes élevés. A l'inverse, si de petits entrants se manifestent, le marché pourrait probablement évoluer vers la concurrence monopolistique.

A ces évolutions de la structure sous l'impulsion concurrentielle s'ajoute le risque accru de déséquilibres quantitatifs et de ruptures d'approvisionnement. Compte tenu des contraintes de production des mineurs et des transformateurs ainsi que des coûts fixes importants liés au démarrage des activités, les coûts de la concurrence du fait de l'inélasticité de l'activité sont potentiellement plus élevés que les gains. La forte hétérogénéité de la filière (celle des firmes et celle du concentré produit) ne peut pas, de façon réaliste, opérer dans les conditions de la CPP. L'usage de la TC en tant que prix unique des transactions va obliger les firmes à standardiser le concentré, ce qui serait en contradiction avec l'équilibre technique et l'efficacité de l'exploitation des ressources.

Ces deux hypothèses de travail nous permettent de dégager cinq fonctions qui peuvent être associées directement à la TC :

- La gestion des flux
- Le contrôle du pouvoir de marché de chacun pour garantir la coopération
- Le partage du profit
- La garantie d'un niveau plancher de capacités de transformation
- La garantie d'une exposition limitée à la volatilité du prix du métal

Cette liste de fonction dépasse les attributions classique d'un prix, notamment dans la régulation du marché. C'est pourquoi il nous semble plus adapté de parler de "prix géré" pour désigner la TC : un instrument qui a les caractéristiques d'un prix mais mis au service d'un but plus large et modifiable si besoin. Cette conclusion confirme que la TC est un instrument particulièrement adapté à la filière du zinc.

L'utilisation de la TC facilite également la conclusion de contrats de long terme et, par conséquent, permet la gestion des flux physiques. De par son usage, la TC incite les firmes

à se comporter de manière coopérative, assurant un revenu minimum à tous les participants de la filière. Ce mécanisme contribue à encadrer le pouvoir de marché des mineurs, principaux bénéficiaires du revenu du prix du métal. Le partage du profit réalisé à l'aide de la TC correspond à la troisième fonction identifiée de la TC.

Par ailleurs, la TC permet de garantir un certain niveau des capacités de transformation, ce qui permet un *matching* des capacités de transformation (hétérogènes) avec la demande de transformation (hétérogène elle aussi) émanant des mineurs. Enfin, l'usage de la TC permet aux transformateurs de limiter leur exposition au risque de prix tout en bénéficiant d'une volatilité "maîtrisée" à travers l'usage des coefficients de variation de la TC.

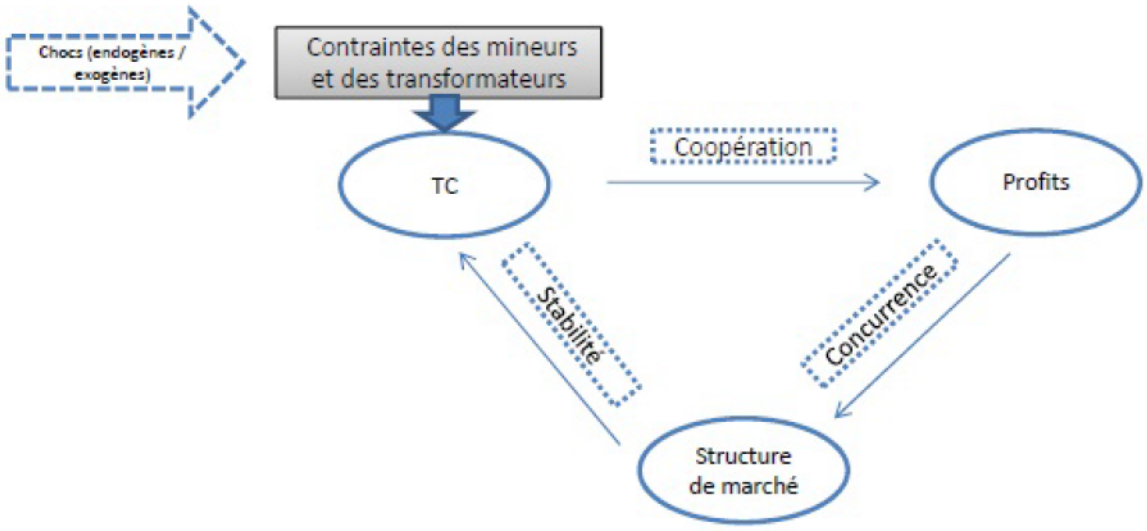
L'hypothèse 1 a permis de mettre en lumière le rôle pivot du partage du profit pour la stabilité de la filière. Un équilibre en oligopole bilatéral peut être stable sans basculer nécessairement dans une entente caractérisée par l'absence d'efficacité. L'hypothèse 2 aboutit à un équilibre par nature instable en raison des contraintes de production de la filière. Ainsi, la structure de la filière pourrait évoluer soit vers la concurrence monopolistique, soit vers une entente, soit vers une intégration verticale avancée avec des éléments du monopole. Nous pouvons sur la base de ces constats proposer une lecture de la stabilité de l'équilibre déterminé par la TC et des mécanismes pouvant renverser cet équilibre.

I.1.2 Stabilité ou rupture de l'équilibre : TC et transmission des chocs

Comme nous l'avons vu au chapitre 1 le niveau de la TC dépend des cinq contraintes de production de la filière : l'hétérogénéité du concentré, la gestion des flux physiques et le stockage, les coûts de main-d'œuvre, d'énergie et de transport. Un niveau pour la TC qui se baserait sur l'équilibre technique se déduit de ces déterminants fondamentaux. L'utilisation de la TC en tant que variable d'équilibre technique assure la stabilité de l'organisation productive de la filière tout en coordonnant les contraintes de production des firmes. Cette conclusion est en accord avec les travaux de Slade (1991) qui démontre l'existence d'un lien positif entre la concentration horizontale et la stabilité des prix sur les marchés des métaux

Sur la base de cet *équilibre technique* se greffe la problématique des profits globaux de la filière et leur partage pour assurer cet équilibre technique : c'est l'*équilibre économique*. Enfin, ce partage des profits va déterminer la structure du marché selon la logique vue au chapitre 1 et dans la section précédente : c'est l'*équilibre organisationnel* de la filière. Toute évolution de la TC sur la base des déterminants fondamentaux correspond à la mise en place d'une nouvelle structure du marché qui, via le mécanisme de partage du profit (ou son absence) va conditionner

Graphique 3.1: Liens entre la TC, le profit et la structure de la filière



Source : Auteur

l'évolution de la TC. Les liens entre ces étapes sont représentés sur le graphique 3.1.

Ce schéma fait apparaitre le rôle central de la TC dans l'organisation de la filière : la TC est en fait la variable qui boucle la circulation de l'information entre les déterminants fondamentaux et l'environnement en général, et les acteurs de la filière et détermine donc la stabilité de l'équilibre. La règle du partage du profit freine l'apparition de la concurrence entre les firmes de la filière et conditionne la structure du marché existante. Ainsi, l'échange des informations par les firmes sur la base de *open book accounting* dans le sens de Kulmala *et al.* (2002) permet le maintien de la situation actuelle de gagnant-gagnant

Par conséquent, c'est la stabilité de la *structure du marché qui a son tour détermine le maintien de la TC* : un mécanisme du type de la TC n'est pas compatible avec toutes les structures de marchés, ce qui rejoint la conclusion du chapitre 2. La TC détermine la nature de l'équilibre technique, économique et organisationnel qui va se mettre en place et transmet les modification d'un domaine à l'autre. Il est donc possible d'identifier, via la TC, de véritables *canaux de transmission* des chocs.

On peut caractériser les trois équilibres, technique, économique et organisationnel par leur nature : l'équilibre organisationnel va s'établir pour une distribution des firmes (taille, nombre et relations) qui le rapproche plus de la CPP ou du monopole. L'équilibre technique (les 5 déterminants) va aboutir à une plus grande efficacité ou une inefficacité totale dans l'usage des ressources. Enfin l'équilibre économique représente l'allocation des profits globaux entre

mineurs et transformateurs et au sein de ces deux groupes.

Considérons l'équilibre technique : un équilibre donné est atteint pour une dispersion donnée de la qualité des concentré sur le marché, auquel est associé un niveau de TC. Les fondamentaux produisent donc bien un niveau de TC d'équilibre "de début de période". Prenons l'exemple d'une évolution vers plus de standardisation. En raison de l'hétérogénéité du concentré produit, la standardisation passe nécessairement par l'élimination d'une partie de la production minière en raison de sa non-conformité. De la même manière, les transformateurs ne pouvant plus faire de mélanges de concentrés, vont devoir adapter leur méthode de production à un concentré de base, standard et seul à être disponible. Cette évolution est associée à une baisse de la TC qui traduit la réduction de la part du profit des transformateurs. Les transformateurs non efficaces seront éliminés alors que les transformateurs efficaces prendront leurs parts de marché.

La standardisation du concentré dans les échanges, conforme avec les hypothèses de la CPP, favoriserait les firmes de grande taille. Dans ce cas, les petites firmes hétérogènes seront désavantagées, ce qui aura comme conséquence la réduction du nombre de firmes sur le marché. L'application des conditions de la CPP peut donc avoir un effet inverse sur la filière réduisant la concurrence et renforçant l'oligopole.

A l'inverse, une hétérogénéité du concentré va entrainer une hausse de la TC et ce faisant un partage des profits plus favorable aux transformateurs. Cela permet d'assurer la présence de firmes disparates sur le marché, notamment des firmes ayant une stratégie de niche vis-à-vis de la localisation des mines ou de la composition du concentré. On a donc un équilibre technique qui va vers un usage plus différencié des ressources, un équilibre économique penchant vers les transformateurs de petites tailles et un équilibre organisationnel qui tend vers la concurrence monopolistique.

Les cas polaires bornent les équilibres technique, économique et organisationnel. Dans le cas de l'équilibre organisationnel, l'intégration verticale et la cartellisation restent des évolutions possibles pour la structure de la filière. Néanmoins, les exemples récents suggèrent que cette solution est peu probable en raison de nouvelles contraintes de rentabilité et de gestion imposées aux grandes firmes intégrées verticalement[2] et des lois anti-trust américaines ou européennes.

L'équilibre technique correspond à l'usage des ressources, allant de l'exploitation efficace à l'inefficacité totale. Les efforts des mineurs et des transformateurs dans l'objectif d'améliorer la productivité et l'efficacité[3] confirment que la situation actuelle tend vers plus d'efficacité. Cette

[2]Le récent exemple d'actualité correspondant à la séparation de la société Alcoa en deux entités (Upstream Firm et Value-Add Firm) témoigne de la possibilité de maintenir le pouvoir de marché sans pour autant procéder à l'intégration verticale des unités de production.

[3]Pour plus d'information sur l'amélioration du processus productif des transformateurs voir Moats *et al.*

recherche d'efficacité est une conséquence logique de l'évolution de la filière, comme démontrent Suwala et Labys (2002) sur l'exemple de l'industrie de charbon. Or, comme nous avons démontré dans la section II, les stratégies individuelles peuvent pousser les firmes à être moins efficaces pour obtenir un profit plus élevé. Le contenu métallique correspond à une variable d'ajustement de ce type[4].

Le partage des profits est issu des conclusions du chapitre 1 où les cas polaires correspondent au profit total de la filière ou bien au profit nul. La multitude des situations intermédiaires correspond aux situations où le mineur et le transformateur dégagent un profit non nul.

On peut cependant proposer une distinction *qualitative* entre les différentes variations de la TC. Il apparait clairement que des changements de faible amplitude ne change pas fondamentalement l'équilibre de la filière sans même parler de remettre en cause l'existence de la TC. Cependant, comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, un changement fort de la nature des équilibres[5] peut remettre en cause l'existence de la TC même. Nous allons donc d'abord étudier des variations de la TC et donc de l'équilibre compatible avec le maintien de cette même TC avant d'étudier des scénarios où les valeurs induites de la TC sont incompatible avec son maintien (section II).

Cette différence qualitative peut être décrite par analogie au fameux "serpent dans le tunnel" du système monétaire européen avant l'euro. Le tunnel est formé des deux valeurs minimum et maximum que la TC peut prendre sans remettre en cause sa propre existence. Nous proposerons une estimation de ces valeurs en fin de chapitre, mais elle vont intuitivement prendre une valeur similaire aux valeurs issues de l'oligopole du chapitre 1.

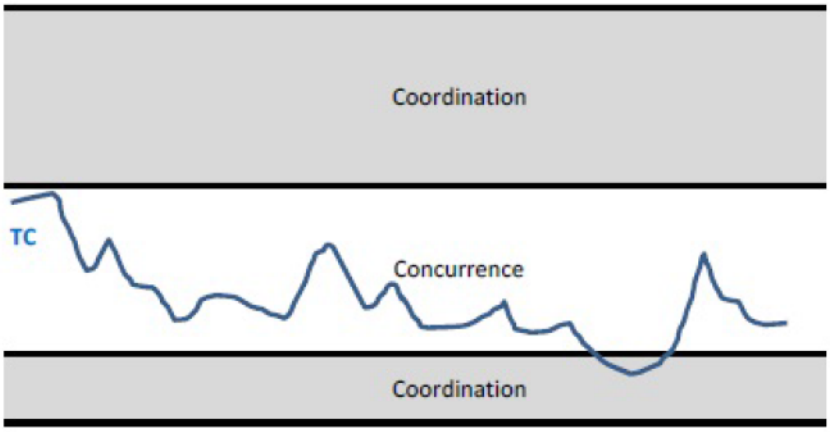
Le serpent représente l'oscillation des valeurs prises par la TC (Graphique 3.2) : au sein du tunnel ces valeurs changent bien les équilibres de la filière mais ne sont pas de nature "systémiques", elles ne remettent pas en cause le système de valorisation basé sur la TC. Les fluctuations de la TC à l'intérieur des bandes correspond à son comportement en tant que prix géré, proche d'un prix en CPP. Au-delà des limites imposées, un effort de coordination supplémentaire est nécessaire afin d'assurer la pérennité de la filière. De cette manière, lorsque le niveau de la TC atteint les limites (minimum ou maximum), les firmes doivent intervenir pour éviter que la TC ne sorte de ces bandes de fluctuation, cette intervention a lieu lors des négociations annuelles.

(2010), Tuominen et Kojo (2005). (Moel et Tufano, 2002) détaille les facteurs justifiant la fermeture des mines.

[4]Les différences entre le revenu de la TC et celui du prix du métal poussent le transformateur à privilégier le concentré à faible contenu métallique pour maximiser le revenu de la TC, alors que le concentré à contenu métallique important est préféré lorsque le prix du métal est élevé.

[5]Tel que le passage à la concurrence pure et parfait dans le chapitre 2.

Graphique 3.2: Représentation schématique de limites des fluctuation de la TC



Source : Auteur

Nous faisons appel à la notion de la volatilité de la TC pour décrire ses variations au sein du tunnel.

On distingue la volatilité historique et la volatilité implicite. La volatilité historique d'une variable (par exemple, d'un actif financier) caractérise ses fluctuations passées, dans notre cas il s'agit des fluctuations passées de la TC. La volatilité implicite caractérise les anticipations des agents sur les amplitudes des variations à venir, elle est élevée lorsque l'incertitude des firmes est forte. Nous nous intéressons dans le cas présent uniquement à la volatilité historique de la TC [6].

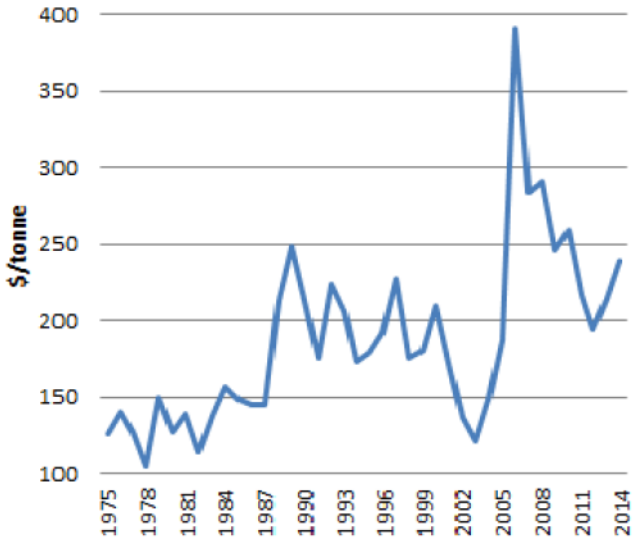
Les données historiques des la TC nous permettent de constater l'augmentation de l'ampleur des fluctuations de la TC à partir des années 2000 (Graphique 3.3). Les observations de la TC réalisée contiennent la volatilité propre à la TC et celle du prix du métal[7]. La série des données présente une valeur maximum à 390 $/t en 2006 et une valeur minimum à 105 $/t en 1978, la moyenne de la série de la TC réalisée est de 186 $/t caractérisée par un écart type de 58.[8] Les valeurs importantes prises par la TC entre 2006 et 2008 s'expliquent par les fluctuations du prix du métal, ce qui ne permet pas de qualifier ces occurrences de "sortie du tunnel". Ces résultats témoignent d'une stabilité des fluctuations de la TC à l'intérieur des limites de fluctuation

[6]En faisant cette distinction nous nous écartons de la définition de la volatilité implicite issue du modèle de (Black et Scholes, 1973) et calculée à l'aide l'algorithme de Newton-Raphson.

[7]Selon (Hewitt et Wall, 2000) la volatilité du prix du zinc peut s'observer à travers les termes du contrat. Dans les années 70 environ 60% des contrats du zinc sur le continent ont été conclus en utilisant le prix spot. Compte tenu de la volatilité du prix du zinc dans les années 80, une grande partie des consommateurs a décidé de passer à la fixation du prix sur la moyenne du mois pour faire face à la volatilité croissante du prix.

[8]Cette distribution est décalée à gauche de la médiane et elle a donc une queue de distribution étalée vers la droite (skewness = 1.28). la distribution est leptokurtique ayant des queues plus épaisses que la normale aux extrémités (kurtosis = 5.27).

Graphique 3.3: TC réalisée (1975-2014)



Source : Euromin

acceptables pour la filière.

Comme avec le serpent monétaire, il serait possible de sortir du système TC par glissement successifs, en se rapprochant année après année de l'un ou l'autre des deux bords du tunnel. Mais il est possible qu'un changement plus rapide et plus radical se produise sous l'action d'un choc. Ce choc se répercuterait sur la TC, qui a son tour modifierait l'ensemble des équilibres de la filière et par ajustements successifs, un TC "de fin de période" incompatible pourrait alors émerger. Nous proposons de différencier ces chocs entre chocs *exogènes*, provoqués par des éléments extérieurs à la filières, et chocs *endogènes*, générés par un changement brusque et non anticipé au sein de la filière. Nous étudierons les conséquences très différentes de ces deux types de chocs.

Ces chocs exogènes ou endogènes vont donc d'abord avoir une influence sur la TC, qui se propagera ensuite dans la filière via le partage des profits. Nous utilisons donc l'évolution du profit individuel des firmes en tant que critère de l'impact de ces chocs. Nous jugeons ensuite de l'évolution jointe de la TC et de celle du profit individuel pour conclure sur l'évolution de la filière. Une absence d'ajustement de l'une de ces variables traduit une instabilité du système menant à une probable rupture de l'équilibre. Ce raisonnement s'applique lors de l'interprétation des résultats du questionnaire et des simulations du modèle théorique. Ce cadre conceptuel posé, nous pouvons procéder à l'analyse des chocs les plus courants touchant la filière du zinc.

I.2 Equilibre de la filière : chocs passés et canaux de transmission

I.2.1 Calibrage du modèle et choix des scénarios

Nous utilisons le modèle théorique présenté dans le chapitre 2 afin de modéliser les impact des chocs *endogènes* à la filière du zinc. Le modèle développé précédemment est enrichi à l'aide de différents paramètres relatifs à la valorisation du concentré[9]. Les fonctions du profit du mineur et du transformateur sont également intégrées dans les calculs pour identifier les impacts financiers des changements modélisés. La modélisation est réalisée en utilisant la programmation non-linéaire disponible dans le logiciel GAMS, (General Algebraic Modeling System[10]), en utilisant l'opérateur CNS[11]. Cette application s'inspire des travaux de (Bouët *et al.*, 2014) sur le taxes à l'exportation appliquées au marché des oléagineux. Néanmoins, la portée de notre modèle se limite uniquement aux chocs endogènes de la filière sans tenir compte des différences entre les pays en termes de la politique commerciale.

La modélisation à l'aide de la programmation non-linéaire permet de répondre à plusieurs questions qui sont soulevées dans cette partie. Est-ce que la volatilité de la TC peut s'expliquer seulement par les changements structurels sur le marché ? Est-ce que les ajustements sur le marché du concentré ont lieu en réponse à la totalité des chocs modélisés ou bien certains chocs ne modifient pas les variables du marché ?

Nous utilisons un modèle simplifié permettant de faire la différence entre la localisation géographique des mineurs et des transformateurs (3 mineurs sont localisés dans 3 pays différents, 2 transformateurs sont localisés dans 2 pays différents), nous n'excluons pas l'existence des pays disposant des sites d'extraction et de transformation en même temps. Les pays font du commerce du concentré en utilisant le prix résiduel, c'est-à-dire la valorisation du concentré basée sur le prix du métal et la TC. Les mineurs proposent du concentré (offre du concentré), les transformateurs achètent du concentré (demande du concentré) et ils produisent du métal (offre du métal) ; la demande du métal est une demande globale. Les fonctions de l'offre et de la demande du concentré sont isoélastiques. Le graphique 3.4 détaille les variables utilisés pour la modélisation de ces marchés et les liens entre elles [12].

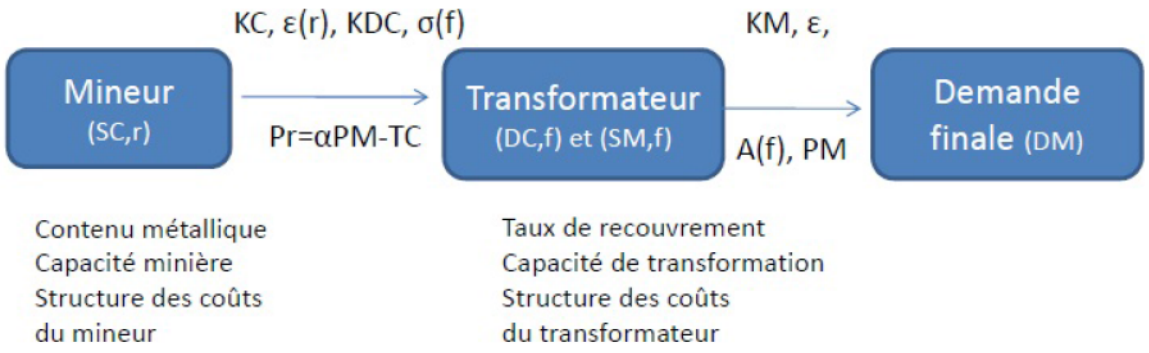
[9] On introduit dans la valorisation du concentré les paramètres traduisant la part du métal payable, les coefficients de variation de la TC, le taux de recouvrement et les coûts opérationnels des transformateurs. Nous faisons également la distinction entre la TC de base et la TC réalisée.

[10] Voir Brooke *et al.* (1997), Rosenthal (2012) pour plus de détail sur utilisation de ce logiciel.

[11] Le détail du programme utilisé dans le logiciel est disponible dans l'annexe G.

[12] Ce graphique est une représentation du modèle d'équilibre partiel développé dans la section II du chapitre 2. En raison de l'impossibilité d'utiliser certains caractères alphanumériques lors de la programmation, nous avons renommé une partie des variables. Le détail des variables est disponible dans l'annexe G.

Graphique 3.4: Les variables de la filière



Source : Auteur

Les volumes de production des chacune des firmes sont présentées dans le tableau 3.1. L'Australie est un exemple du pays développé ressemblant au transformateur T1, où il existe des sites d'extraction et de transformation du concentré. La capacité de transformation du transformateur T1 ne suffit pas pour absorber tout le concentré extrait, une partie du concentré du transformateur T1 est exporté sur le marché mondial. Les autres pays du modèle disposent soit de sites de transformation soit de sites d'extraction. L'offre et la demande de concentré sont à l'équilibre : 3500 milliers de tonnes de concentré.

Tableau 3.1: Volume de production des firmes

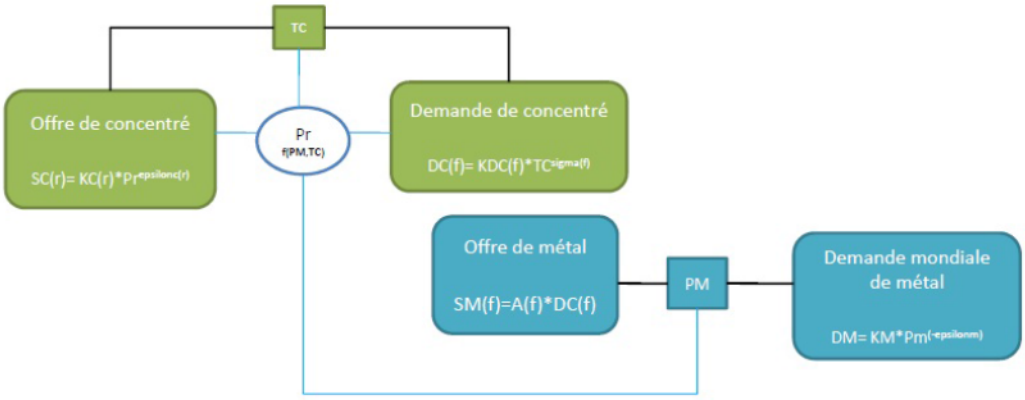
Agent	**Volume en ktonnes**
Mineur 1 (Australie)	1300
Mineur 2 (Pérou)	1500
Mineur 3 (Etats Unis)	700
Transformateur 1 (Pays développés)	500
Transformateur 2 (Chine)	3000

Source : Auteur

Le prix du métal est défini à 2500 \$/t avec un niveau de TC de 2000\$/t et le prix du métal de base de 2000 \$/t, les coefficients de variation de la TC sont définis à 0.1, le taux de recouvrement de tous les transformateurs sont identiques et égaux 85% [13]. Les valeurs des élasticités de l'offre et de la demande sont comme suit :

[13]Modèle : $V5_1$ Treatment Charge.gms.

Graphique 3.5: Composants du modèle



Source : Auteur

- Elasticité de l'offre du concentré par rapport au prix résiduel : 0.3 (estimée[14]).
- Elasticité de la demande du concentré par rapport à la TC : 0.7 (estimée).
- Elasticité prix de la demande du zinc : 0.68 (valeur issue de Chen *et al.* (2012), en ligne avec les estimations de WTO. General Agreement on Tariffs and Trade (1984, 1985)).

Le modèle développé (Graphique 3.5) permet de calculer les impacts des paramètres de production et de valorisation sur les variables du modèle dans les conditions du nouvel équilibre (l'offre, la demande, les variables de prix et la TC). Les comparaisons des profits individuels des mineurs et des transformateurs permettent de juger de l'impact des changements proposés et d'identifier les bénéficiaires potentiels de ces changements ainsi que de juger de la stabilité du système actuel de valorisation.

Nous cherchons à établir le niveau de TC correspondant à l'équilibre économique des acteurs de la filière. Nous modélisons trois scénarios qui nous permettent d'établir le niveau de TC en cas de choc touchant les mineurs et les transformateurs. Ces scénarios résument les contraintes de production des firmes de la filière (l'hétérogénéité des concentrés, la sécurité des approvisionnements, les coûts de main d'œuvre, les coûts d'énergie et les coûts de transports.). Ainsi, l'interprétation des résultats des scénarios permettra de juger du maintien ou de l'élimination des fonctions considérées.

[14]Le détail de l'estimation est disponible en annexe G.

Scénario 1. Taux de recouvrement

Scénario 2. Coût de transformation

Scénario 3. Contenu métallique

Le *scénario 1* présente les conséquences de la modification du taux de recouvrement. Le taux de recouvrement est associé à la fonction de gestion des flux réalisée par la TC. En effet, le taux de recouvrement va déterminer le besoin en concentré du transformateur et, respectivement l'offre du concentré émanant du mineur. C'est un paramètre maîtrisé par le transformateur, différenciant les transformateurs entre eux. La modification du taux de recouvrement est un phénomène d'actualité : une partie des transformateurs se distinguent aujourd'hui par des taux de recouvrement supérieurs aux autres. Reste à évaluer les conséquences de ces variations des techniques de production sur la stabilité de l'équilibre de la filière.

Nous proposons dans le *scénario 2* l'étude de variation du coût de transformation. Il s'agit d'intégrer dans notre analyse l'hétérogénéité liées aux coûts des transformateurs, reflétant l'accroissement du nombre des transformateurs dans les pays à bas coûts. Les bénéfices de la variation du coût de transformation peuvent être utilisées par les firmes pour prendre des parts de marchés et ainsi accroître leur pouvoir de marché. Les résultats de ce scénario devront identifier s'il existe un risque de modification du pouvoir de marché suite au changement des coûts de transformation.

Le *scénario 3* détaille la fonction de la compensation de la TC à travers l'évolution du contenu métallique. Il s'agit d'un paramètre partiellement contrôlé par les mineurs, mais indépendant de leur volonté lorsqu'il s'agit notamment de la baisse générale de la quantité du métal dans le minerai. Le contenu métallique englobe la contrainte d'hétérogénéité du concentré associée à l'activité du mineur. Nous cherchons donc à savoir si le mécanisme de compensation des profits entre les firmes continue à fonctionner en cas de choc sur le contenu métallique.

En dehors de ces trois scénario permettant de qualifier les évolutions récentes au sein de la filière, nous proposons les scénarios prospectifs liés à l'évolution de la TC et du contrat de concentré. Nous procédons à la comparaison entre la TC fixe et la TC variable pour juger des différences de profit obtenus par les firmes dans les deux cas. Cette comparaison est effectuée pour illustrer l'intérêt de chacune des solutions et ainsi justifier la divergence des avis des mineurs et des transformateurs sur le sujet. Nous complétons cette analyse par la modélisation des souhaits des firmes relatifs à la volatilité de la TC (réduction des coefficients de variation de la TC) et de l'exposition du transformateur au risque du prix du métal (modification de la part payable).

I.2.2 Quelles conséquences pour les évolutions de la TC ?

Nous procédons aux simulations des chocs sur les paramètres de production des firmes, ces chocs correspondent aux évolutions de la filière récentes. La stabilité de la filière et celle de l'utilisation de la TC sont ensuite discutées sur la base de ces simulations.

Scénario 1. Taux de recouvrement

Nous testons dans le cadre de ce scénario la forte amélioration du taux de recouvrement des transformateurs des pays développés (T1) de 1960 à nos jours (Tableau 3.2). L'augmentation du taux de recouvrement par le transformateur T1 se traduit par une baisse de sa demande de concentré et par l'augmentation de son offre de métal. Cette baisse de la demande de concentré entraine une baisse de la TC pour maintenir l'équilibre économique des mineurs. Le transformateur T2 subit une baisse du profit unitaire et du profit total, alors que le transformateur T1 bénéficie d'une augmentation de son profit de part l'amélioration de son taux de recouvrement.

La modification du taux de recouvrement entraine donc une baisse de la TC. La manipulation du taux de recouvrement peut donc être un outil de pression du transformateur sur les concurrents et sur les mineurs. Ce scénario illustre également les tensions entre transformateurs pour obtenir plus de parts de marché. Alors que la part de marché du transformateur T1 pour le concentré reste stable (environ 14%), sa part de marché pour le métal passe de 14% à 17%. A l'inverse les mineurs supportent la baisse de la demande de concentré de façon homogène. La distribution des parts de marché est donc inchangée pour l'offre de concentré, la fonction de la gestion des flux est toujours assurée par la TC dans ce scénario. La modification asymétrique des taux de recouvrement pose donc potentiellement problème du point de vue de la coordination de l'ensemble de la filière. La variation des taux de recouvrement favorise les stratégies *beggar-thy-neighbour* où une firme cherche à améliorer son profit en réduisant celui des autres.

Scénario 2. Coût de transformation

Ce scénario repose sur des gains de productivité réalisés le transformateur T2 qui voit ainsi son coût unitaire de production baisser. Il est inspiré de la stratégie actuelle des transformateurs chinois qui, portés par l'amélioration des conditions de production en Chine, deviennent relativement plus compétitifs en terme de coûts que leurs concurrents des pays développés. Notre coût unitaire de production de base est de 500 \$/t[15] ce qui placerait les transformateurs chinois au niveau des transformateurs des pays développés. Ce constat est à relativiser au vue de l'augmentation récente des coûts de production en Chine.

[15]Ce coût correspond au coût unitaire de production du transformateur européen *Nyrstar* en 2009.

Tableau 3.2: Scénario 1 - Variation du taux de recouvrement pour le transformateur T1

Taux de recouvrement T1	**80%**	**85%**	**90%**	**95%**	**99%**	**99%**
Taux de recouvrement T2	85%	85%	85%	85%	85%	99%
TC	201	200	199	198	198	200
Prix du métal	2 503	2 500	2 497	2 494	2 491	2 500
Prix résiduel	814	812	811	809	808	812
Offre de concentré						
Australie	1 307	1 300	1 294	1 287	1 282	1 300
Pérou	1 507	1 500	1 492	1 485	1 480	1 500
Etats Unis	704	700	696	693	691	700
Demande de concentré						
T1 (Pays développés)	503	500	497	495	493	500
T2 (Chine)	3 015	3 000	2 985	2 972	2 960	3 000
Quantités sur le marché du concentré	**3 518**	**3 500**	**3 482**	**3 467**	**3 453**	**3 500**
Offre de métal						
T1	402	425	447	470	488	495
T2	2 563	2 550	2 538	2 526	2 517	2 970
Quantités sur le marché du métal	**2 965**	**2 975**	**2 985**	**2 996**	**3 005**	**3 465**
Profit unitaire, USD						
T1 (Pays développés)	1,12	1,18	1,23	1,28	1,31	1,32
T2 (Chine)	1,08	1,07	1.07	1,06	1,06	1,21
Profit total T1	452	502	552	601	640	652
Profit total T2	2 758	2 739	2 720	2 702	2 688	3 592

Source : Auteur

Cette hausse de la productivité se traduit par une hausse des profits du transformateur T2 (Tableau 3.3). Néanmoins, ce choc n'a pas d'impact sur les valeurs de l'offre et de la demande sur le marché du concentré ou sur le marché du métal. L'intégralité des profits réalisés par T2 est donc distribuée en dividendes, sans réinvestissement pour prendre des parts de marché. Ce résultat est lié à la structure de notre modèle, qui n'inclut pas une modélisation explicite du réinvestissement des profits. Il est également une bonne illustration de la fonction de la TC limitant le pouvoir de marché des firmes.

Cependant, il reflète également une particularité de la filière. Du fait du caractère négocié de la TC, la baisse des coûts ne se traduit pas nécessairement par une stratégie d'expansion, car le paiement marginal à attendre de cette stratégie (la TC est constante) est nul. Il est donc logique que les gains de productivité liés à la structure des coûts ne soient pas réinvestis. La situation du transformateur T1 n'est donc pas modifiée, son niveau de profit inchangé, sa part de marché également. Une baisse des coûts de production, même asymétrique, semble donc favoriser la viabilité économique de la filière sans remettre en cause les équilibres existants

entre les acteurs.

Tableau 3.3: Scénario 2 - Variation des coûts de production du transformateur T2

Coût unitaire de production T2	**500**	**450**	**400**	**350**
Coût unitaire de production T1	500	500	500	500
Profit unitaire du transformateur				
T1 (Pays développés)	1,044	1,044	1,044	1,044
T2 (Chine)	1.044	1.094	1.144	1.194
Profit total du transformateur				
T1 (Pays développés)	444	444	444	444
T2 (Chine)	2 662	2 790	2 917	3 045

Source : Auteur

Scénario 3. Variation du contenu métallique

Le changement dans le contenu métallique résulte de l'activité des mineurs, ce paramètre peut être plus au moins bien contrôlé dans le processus de la production du concentré ; toutefois l'action des mineurs est limité par les contraintes matérielles liées à la richesse du minerai extrait.

Notre valeur de base pour les simulations est un contenu métallique de 60%[16]. Nous abaissons la valeur de ce paramètre jusqu'à 30% par tranches de 10% (Tableau 3.4). Logiquement, un concentré à faible teneur en métal a un prix plus bas et se conjugue avec une offre de métal plus faible. Ce scénario illustre le rôle clef des approvisionnements et de la sélection des mines. La raréfaction temporaire ou permanente d'un concentré à fort contenu métallique affecte plus fortement le revenu unitaire (par tonne de concentré) des mineurs.

Notre modèle produit un autre résultat conforme aux observations : face à cette baisse du contenu métallique, les transformateurs acceptent également une TC plus faible. Nous validons ainsi l'idée d'une "entente" entre les firmes de la filière : une partie des pertes des mineurs due à l'épuisement des mines est compensée par les transformateurs qui acceptent une TC plus faible. La continuité de la production au sein de la filière est ainsi assurée par le système de compensation partielle des pertes via l'ajustement de la TC.

[16]Chaque concentré a une composition unique qui est fonction des métaux contenus, dont le contenu varie entre 40% et 60% avec une moyenne d'environ 55%. (Source : `http://www.zinc.org/basics/`). Dans ce scénario nous retenons une valeur basse de 30% pour tenir compte de l'épuisement progressif des mines riches en minerai, ce qui va se traduire par une baisse du contenu métallique du concentré dans les années à venir (Mudd, 2009).

Tableau 3.4: Scénario 3 - Variation du contenu métallique

Contenu métallique	60%	50%	40%	30%
Variation		*-17%*	*-20%*	*-25%*
TC	213	200	184	165
Variation		*-6%*	*-8%*	*-10%*
Prix du métal	2 340	2 500	2 715	3 034
Prix résiduel	943	812	673	523
Offre de concentré				
Australie	1 359	1 300	1 228	1 139
Pérou	1 569	1 500	1 417	1 314
Etats Unis	732	700	661	613
Demande de concentré				
T1 (Chine)	522	500	472	438
T2 (Pays développés)	3 137	3 000	2 836	2 629
Equilibre du marché du concentré	**3 659**	**3 500**	**3 308**	**3 067**
Offre de métal				
T1 (Chine)	444	425	401	372
T2 (Pays développés)	2 667	2 550	2 410	2 235
Equilibre du marché du métal	**3 111**	**2 975**	**2 811**	**2 607**
Profit unitaire du mineur	0,94	0,81	0,67	0,52
Profit unitaire du transformateur	0,73	1,04	1,43	1,94

Source : Auteur

Synthèse des scénarios

Notre avons exploré au travers de ces trois scénarios la nature et les mécanismes de coordination de la filière de production du zinc. Sur le plan théorique, la filière peut être décrite comme une série d'équilibres instables, ou des chocs exogènes aléatoires permanents font passer les acteurs d'un équilibre temporaire à un autre. Ces chocs sont liés aux 5 contraintes de la filière (voir chapitre 1) et sont transmis à la filière par la TC. Nous avons testé dans le scénario 1 un instrument pour les contraintes des flux, dans le scénario 2 un instrument pour les coûts d'énergie et de main d'œuvre et dans le scénario 3 un instrument pour l'hétérogénéité des concentrés. Notre cadre d'analyse en équilibre à stock nuls ne nous a pas permis de tester directement le rôle de la sécurité des approvisionnements[17].

[17]La prise en compte des stocks aurait probablement ajouté des effets de seuils à nos résultats et augmenté l'instabilité des équilibres, à l'image d'autres marchés organisés (Farmer et Lillo, 2004).

Nos résultats font ressortir le rôle de la TC comme instrument de coordination de la filière. Lorsque les firmes anticipent ou constatent une dégradation de la situation de leurs partenaires commerciaux, elles procèdent aux ajustements (quantitatifs et de la TC) pour remédier à cette situation (scénario 1). Le niveau de la TC doit rester satisfaisant pour les mineurs et les transformateurs afin d'éviter les fermetures et donc les ruptures d'approvisionnement. Le caractère négocié de la TC permet donc de faire face à différents types de chocs, exogènes et endogènes, anticipés ou non.

Ceci n'exclut cependant pas toutes les actions allant à l'encontre de la "solidarité de filière". Une amélioration du taux de recouvrement concentrée sur certains acteurs (ou des investissements dans les infrastructures de transport) ont clairement pour objectif d'augmenter les profits individuels de certains acteurs (scénario 1). Ces actions, en créant une division entre mineurs et transformateurs et au sein du groupe des transformateurs rappellent la dimension compétitive du marché. Il apparait clairement que les évolutions potentielles du système actuel viendront de ce type de comportements. Le scénario 2 nous permet cependant d'affirmer que toutes les stratégies d'amélioration des profits individuels ne mettent pas en péril l'équilibre de la filière.

Notre modèle est bien adapté pour identifier les changements endogènes passés et en cours. Parmi les trois scénarios proposés le scénario 1 illustre un changement important du niveau de la TC susceptible d'être considéré comme une "sortie du tunnel". La modification de l'équilibre technique impacte le niveau de la TC via la contrainte de l'hétérogénéité du concentré. La coopération existante entre les firmes aboutit à une nouvelle répartition des profits au sein de la filière : une baisse du profit des mineurs et une hausse du profit des transformateurs.

Cette modification est à l'origine de l'instabilité de la structure de la filière qui se traduirait par une réduction du nombre de mineurs avec le nombre de transformateurs inchangé ou réduit (pas de nouveaux entrants car les quantités du concentré baissent). Le marché devrait dériver progressivement vers une structure oligopolistique plus concentrée.

Les scénarios 2 et 3 détaillent un équilibre de filière plus robuste : les variations de la TC et, par conséquent, du profit des firmes sont assez contenues. La force du choc sur les contraintes endogènes n'est pas suffisante pour provoquer une modification de la structure de la filière.

Ce scénarios permettent de confirmer l'impossibilité de changement de structure de marché par erreur. Le choc sur les contraintes doit être très important pour que le mécanisme de transmission soit enclenché. Compte tenu de ces éléments il est peu probable que la TC sorte du tunnel sous l'action des forces endogènes que nous avons décrites. La force de rappel des trois équilibres de la filière (équilibre technique, économique et organisationnel) est importante, témoignant de la solidité de l'organisation actuelle de la filière.

Ceci clos notre définition de la stabilité de l'équilibre au sien de la filière du zinc. Nous avons identifié qu'au delà des cinq contraintes de production imposées aux firmes de la filière, les liens entre le profit et la TC permettent de juger de la stabilité de l'équilibre. Nous avons démontré que les chocs passés et présents n'ont pas perturbé l'organisation actuelle de la filière. Il est donc peu probable que les chocs endogènes soient à l'origine de l'évolution de la TC et de la filière.

L'organisation actuelle de la filière est caractérisée comme stable face aux chocs endogènes. Dans la section suivante nous considérons d'autres forces susceptibles de faire évoluer la TC à l'intérieur et en dehors du serpent : la volonté de changement des acteurs ayant un fort pouvoir de marché et les chocs exogènes. C'est donc une étude des évolutions futures et pressenties de la TC que nous proposons dans la section II.

II Evolutions de la TC : anticipations des acteurs, scénarios futurs et contraintes sur la filière

Nous venons d'établir qu'une évolution de la TC du fait de l'action des forces internes à la filière est peu probable. Cependant, la nature même de l'oligopole bilatéral fait qu'un choc non anticipé est plus probable du fait de l'action possible d'un petit nombre de firmes. Il nous semblait donc pertinent d'interroger un échantillon représentatif d'acteurs de la filière pour évaluer les possibilités d'évolution soudaines, par consensus ou confrontation de la TC. La complexité des anticipations des comportements des firmes de la filière réside dans la diversité de leurs profils. L'analyse des réponses et des commentaires des personnes interrogées nous permet d'identifier les changements souhaités ou existants. Nous cherchons à savoir s'il existe une volonté d'évolution de la TC et si les firmes sont prêtes à en accepter les conséquences.

Nous identifions trois "profils" de firmes au sein de la filière dont un comprenant les firmes fortement intéressées par la refonte du système de la TC. L'inertie conséquente des deux autres groupes constitue, selon nous, la principale raison du maintien du système actuel. Nous présenterons ensuite des "scénarios de réforme" basés sur les réponses obtenues et les scénarios de la section précédente. Enfin, nous concluons sur le rôle des chocs exogènes dans ce contexte. Nous pourrons ainsi évaluer les chances d'un maintien de la TC à moyen terme.

II.1 Niveau et variations de la TC : la perception des acteurs

II.1.1 Présentation du questionnaire et statistiques descriptives

Malgré un usage quotidien de la TC, les firmes de la filière ont peu l'occasion d'exprimer leurs avis. La presse spécialisée (Metal Bulletin, Reuters Metal Insider, USGS) rapporte régulièrement les avis des industriels afin d'illustrer les débat sur la TC. Or, il s'agit souvent d'avis singuliers qui ne sont pas représentatifs à l'échelle de l'industrie. Ce constat nous amène à proposer une étude de la TC et des problématiques liées à la gestion de la TC dans le cadre d'une enquête statistique.

Ce travail vise plusieurs objectifs : confirmer nos hypothèses théoriques, illustrer les conclusions des chapitres précédents, comprendre les dynamiques sous-jacentes de la filière, enrichir notre compréhension du fonctionnement de la TC. Les extraits du questionnaire ont déjà été présentés dans les chapitres 1 et 2 sans évoquer le cadre méthodologique et le déroulement de la collecte des données. Nous complétons cette présentation en y intégrant les résultats du questionnaire relatifs à la vision de la TC par les firmes afin d'illustrer les différences de points de vue des mineurs et des transformateurs.

La population visée dans l'enquête est composée des sociétés minières et transformatrices et est assez limitée. Les ouvrages spécialisés consacrés à l'échantillonnage indiquent 3 critères dans le choix de la taille de l'échantillon. Ils sont basés sur le niveau de la précision la marge d'erreur (traditionnellement fixé à 5%), le niveau de confiance déterminé par le Théorème Central Limite (distribution normale : 95% de l'échantillon se trouve à deux écarts types de la moyenne de la population globale) et la variabilité relative dans l'échantillon (nécessité de choisir un échantillon plus important pour une population très hétérogène) [18]. La population que nous souhaitons interroger est de taille très limité, ce qui rend le choix de la taille de l'échantillon plus délicat.

Selon Israel (1992) lorsque l'on a affaire a une « petite » population, on peut utiliser plusieurs méthodes de détermination de la taille de l'échantillon. Premièrement, il est possible d'interroger tout simplement toute la population afin d'éviter la non-représentativité de l'échantillon. Or, il ne nous sera pas possible d'effectuer une enquête exhaustive en interrogeant toutes les firmes participant au marché des concentrés pour des raisons de coût et de durée. Une autre solution consiste à se baser sur la taille des échantillons des études précédentes, ceci au risque

[18] Traditionnellement pour les échantillons conservateurs, on utilise une valeur de 50% qui correspond au niveau le plus élevé de variabilité possible. La réduction de la variabilité passe par l'augmentation de la taille de l'échantillon.

de reproduire les mêmes erreurs d'échantillonnage.

L'étude de Slade (2004) sur la profitabilité des sociétés minières et transformatrices se rapproche de la nôtre au regard de la population interrogée. L'échantillon de Slade se base sur les 20 plus grandes sociétés par type de matière première et type d'activité. Seules les sociétés de taille importante intéressent l'auteur afin d'éliminer le biais des économies d'échelle. La troisième solution consiste à déterminer la taille de l'échantillon à l'aide des tables (Bartlett *et al.*, 2001, Israel, 1992) ou des formules statistiques (Cochran, 1963, Yamane, 1967, Smith, 1983).

Lors de l'élaboration de l'échantillon nous prenons en compte la méthode statistique qui sera utilisée pour le traitement des réponses obtenues. Une simple étude statistique des réponses ne nécessite pas de considérations particulières [19].

Nous souhaitons analyser les réponses au questionnaire à l'aide de l'analyse factorielle qui permet d'aller au-delà des simples analyses unidimensionnelles et bidimensionnelles des données obtenues. La détermination de la taille de l'échantillon acceptable pour ce type d'études est basée notamment sur le nombre de variables et des vecteurs construits lors de l'analyse. Traditionnellement un échantillon assez important est requis pour la réalisation d'une analyse fiable (un minimum de 100 observations (Preacher et Maccallum, 2002, Fabrigar *et al.*, 1999)). Or, de plus en plus d'auteurs utilisent des techniques d'analyse factorielle sur de petits échantillons (notamment dans le domaine de la médecine, de la psychologie, des sciences humaines) ce qui a donné lieu à de nombreuses études sur la taille minimale des échantillons requise pour réaliser l'analyse factorielle.

La plupart des études consacrées aux petits échantillons préconise de calculer un ratio du nombre d'individus par rapport au nombre de variables, selon les auteurs ce ratio varie de 20 :1 (Hair *et al.*, 1995) à 5 :1 (Gorsuch, 1983) en passant par 10 :1 (Everitt, 1975, Velicer et Fava, 1998). Barett et Kline (1981) ont comparé les résultats de l'analyse factorielle de deux sous-échantillons, respectivement un sous-échantillon de 48 individus pour 16 variables (ratio 3 :0) et un sous-échantillon de 112 individus pour 90 variables (ratio 1 :2), les résultats obtenus pour chaque sous-échantillon ont été satisfaisants [20].

[19] Un échantillon de moins de 30 individus nécessiterait l'application de la loi de Student qui correspond au cas de la non-normalité de la distribution Chêne et Savès (2008).

[20] (Fabrigar *et al.*, 1999) ont recensé les articles des journaux utilisant l'analyse factorielle dans le domaine de la psychologie. Ils ont conclu qu'environ 18.9% d'articles contenait des échantillons de 30 individus dans « Journal of Personality and Social Psychology » et 13.8% d'articles contenaient un échantillon de moins de 100 individus dans « Journal of Applied Psychology » avec un ratio de 4 :1 ou moins dans 24% des articles du « Journal of Personality and Social Psychology » et 34% des articles dans le « Journal of Applied Psychology ».

En l'absence de consensus sur le critère de choix de la taille de l'échantillon, nous privilégions les critères de bon sens et le bon pouvoir explicatif des études. La qualité de l'analyse est plutôt jugée en termes de communalités qu'en termes d'échantillon (Preacher et Maccallum, 2002, Osborne et Costello, 2004, 2005)[21]. Par ailleurs, le pouvoir explicatif du modèle est à privilégier lors du choix de la taille de l'échantillon : "Recent studies suggest that the required sample size depends on the number of factors, the number of variables associated with each factor, and how well the set of factors explains the variance in the variables" (Bandalos et Boehm-Kaufman, 2009).

Compte tenu de ces éléments, nous allons déterminer la taille de l'échantillon sur la base des tables statistiques et des études similaires réalisées dans ce domaine. Au moment de la réalisation de l'analyse factorielle nous allons prêter une attention particulière au ratio du nombre des individus et des variables utilisées en contrôlant les communalités (qualité de la représentation).

La liste des principales firmes minières et transformatrices a été compilée par l'auteur sur la base des rapports (ILZSG, India Zinc, Unctad) et complétés suite aux conseils de Chris Parker de Brook Hunts. Seules les sociétés impliquées directement dans les opérations physiques ont été sélectionnées. Ces sociétés possèdent souvent plusieurs sites de production et peuvent se positionner en tant que sociétés produisant le concentré et le transformant en même temps. Nous avons retenu 59 sociétés sachant pertinemment que cette population possède un biais en défaveur de petites sociétés minières et transformatrices chinoises. Notre questionnaire est anonyme, seules les réponses aux questions sur la localisation, la taille et l'activité de la firme permettent de différencier les réponses.

Ce biais est considéré comme acceptable, en raison de la politique gouvernementale chinoise visant la concentration de ces firmes. Seules les firmes chinoises de taille importante ont été retenues dans notre liste. Compte tenu de la structure du marché présentée dans le chapitre 1, nous sommes conscients qu'une importante part de marché est détenue par les dix plus grandes firmes minières et transformatrices. Ainsi, l'inclusion de ces dix firmes dans l'échantillon permettrait de rassembler les avis de ceux qui procèdent plus de 50% du volume de concentré.

Nous avons déterminé un échantillon de 24 répondants qui correspond à l'erreur statistique

[21] « As long as communalities are high, the number of expected factors is relatively small, and the model errors low (a condition which often goes hand-in-hand with communalities), researchers and reviewers should not be overly concerned about small sample sizes » Preacher et Maccallum (2002). " "Strong data" in factor analysis means uniformly high communalities without cross loadings, plus several variables loading strongly on each factor" (Osborne et Costello, 2005). "There are diminishing returns, but even at large subject to item ratios and sample size (such as 20 :1 ratio or N > 1000) and with unrealistically strong factor loadings and clear factor structures, EFA and PCA can produce error rates up to 30% leaving room for improvement via larger samples" (Osborne et Costello, 2004).

(E) de 10% et au niveau de confiance (z) de 80% au lieu de 95%-90% utilisés usuellement lors de l'application de la formule correspondante[22]. Cette taille de l'échantillon permet donc d'obtenir les résultats statistiquement valides qui pourraient être généralisés à la population totale.

La technique de sélection des firmes est donc de type semi-aléatoire, car nous imposons le questionnaire aux 10 plus grandes firmes minières et aux 10 plus grandes firmes transformatrices (technique de sélection similaire à celle de Slade (2004) et Farr et Lord (2003)). Compte tenu de la nature de leurs activités, il s'agit de 13 firmes, car sept d'entre elles rentrent simultanément dans le top 10 de mineurs et de transformateurs. Ces réponses devront être complétées par les réponses de 11 autres firmes aléatoires.

Le taux de non-réponse pour ce type d'études étant assez élevé, nous avons décidé de le traiter de deux manières. D'abord, il y a un certain nombre de firmes dont les réponses sont souhaitables (top 10 des firmes de chaque type), pour cela nous avons privilégié l'identification des contacts directs au sein des firmes afin d'assurer un taux de réponse important (base de données de Brook Hunts[23]). Nous appliquons le taux de réponse de 80% pour les firmes du top 10, ce qui veut dire qu'on s'attend à 10-11 réponses pour 13 firmes interrogées.

Le taux de réponse pour les firmes restantes est estimé à 30% passant ainsi le nombre des firmes à interroger à 37. Ce chiffre se rapproche de la totalité de la population hors les firmes du top 10. De ce fait, nous avons envoyé le questionnaire à la totalité de la population[24]. Nous avons choisi 3 sociétés d'exploration en tant que sociétés-pilotes afin de tester le questionnaire[25].

Le taux de réponse constaté est de 41% pour les firmes tirées au sort (9 réponses obtenues) et de 83% pour les firmes du top 10 (15 réponses obtenues). 3 firmes du top 10 ont refusé de répondre au questionnaire en argumentant par écrit leur refus de participer. Les firmes tirées au sort n'ont pas souhaité indiquer les raisons de non réponse au questionnaire.

Nous avons conscience d'un éventuel biais propre aux caractéristiques de notre échantillon, ce qui nous amène à rester prudents dans la présentation de nos analyses. Malgré les limites

[22]Sur la base de la formule de calcul de la taille de l'échantillon : $n = Nz^2pq/(E^2(N-1)+z^2pq)$ avec n la taille de l'échantillon, N la taille de la population, p et q les paramètres de la distribution des réponses, z le niveau de confiance et E l'erreur acceptée.

[23]La liste des contacts fournis par Brook Hunts est une base de données privée, elle est disponible sur demande auprès de l'auteur

[24]Le questionnaire a été envoyé par mail sous forme de lien vers une forme GoogleDocs assorti d'une pièce jointe. Les répondants avaient le choix de remplir le questionnaire en ligne ou bien de remplir le document papier qui leur a été envoyé par mail. Les questionnaires pilotes ont été traitées en automne 2012 et la collecte des réponses a été réalisée entre mai 2013 et août 2014.

[25]Les sociétés d'exploration ne sont pas directement impliquées dans les opérations physiques du concentré, mais ont une bonne connaissance des problématiques étudies, ce qui justifie leur choix en tant que sociétés pilotes.

de la représentativité de notre échantillon, les informations que nous espérons obtenir justifient ce travail. Même s'il s'agit pour l'instant d'une première étude, nous espérons que d'autres enquêtes sur le marché du concentré permettront une accumulation de résultats convergents et par conséquent, viendront apporter une meilleure compréhension des phénomènes observés.

Le questionnaire est structuré en cinq parties chacune visant un objectif d'approfondissement de différents phénomènes du marché étudié. Les questions d'introductions complètent les cinq parties et permettent d'identifier les firmes en fonction du type de l'activité (transformateur, mineur ou autre), de la localisation géographique et de la taille des firmes. Les parties cernent respectivement 1) la manière comment la TC est prise en compte dans l'équilibre de la firme, 2) comment la firme réagit aux variations de la TC, 3) l'attitude de la firme par rapport aux négociations de la TC, 4) la gestion du risque de la TC et 5) le positionnement par rapport aux substituts de la TC.

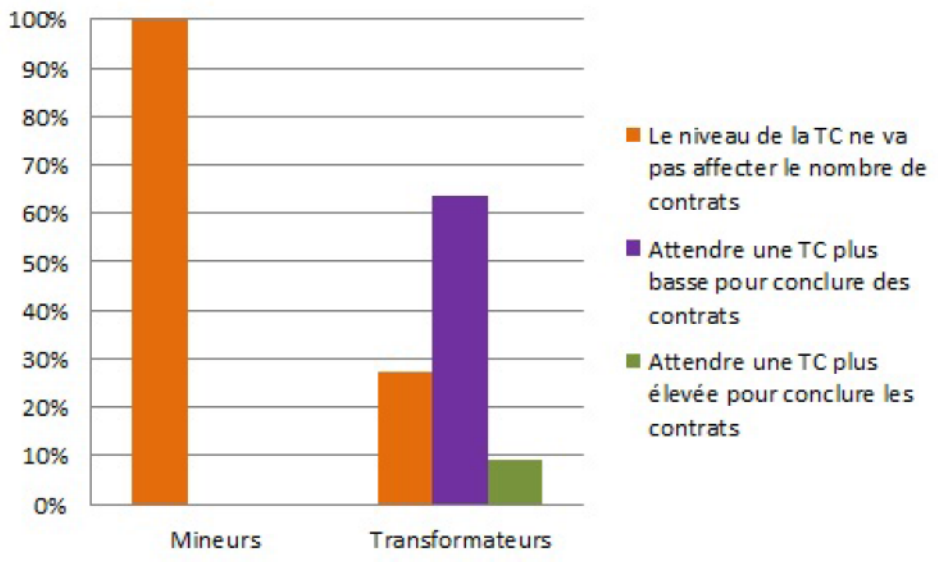
Différents types de questions sont proposées en fonction du niveau de détail recherché. Nous utilisons principalement les questions qualitatives dichotomiques pour connaître le sentiment ou bien la position des firmes par rapport à un phénomène donné. Les questions qualitatives multichotomiques permettent aux participants de faire un choix parmi plusieurs propositions (questions nominales). Ces questions sont proposées lorsque nous souhaitons mieux identifier les phénomènes sur lesquels il n'existe pas de consensus dans les études précédentes.

Les questions qualitatives ordinales visent à proposer une échelle de mesure (principalement de 1 à 5) afin d'évaluer l'ordre des choix des participants. Un certain nombre de questions ouvertes sont également introduites dans le questionnaire dans l'objectif de mieux comprendre les raisons des choix liés aux questions précédentes ou bien afin d'obtenir des informations complémentaires approfondissant notre étude.

Le contenu du questionnaire et les objectifs des questions par type de problématique sont fournis en annexe II (nous y joignons également le formulaire du questionnaire, la base des données des firmes interrogées et la liste des réponses obtenues). L'exploitation des données du questionnaire se fait à l'aide des techniques statistiques conventionnelles et de celles de l'analyse factorielle des données qualitatives. Une partie des résultats du questionnaire a déjà été présentée dans les chapitres 1 et 2, nous présentons donc une synthèse des résultats qui n'ont pas encore été détaillés.

Théoriquement, le clivage naturel entre les firmes de la filière réside dans les différences de métiers et donc de positions sur le marché au sein de cette filière. Ainsi, les mineurs et les transformateurs ont des comportements différents lors des négociations de la TC. De plus, leurs réactions divergent face aux déséquilibres quantitatifs. Au travers des réponses aux trois

Graphique 3.6: Surplus du concentré



Source : Auteur

premières parties du questionnaire[26] nous mettons en évidence le clivage existant entre les firmes sur la base de leur activité. D'abord, nous présentons les résultats relatifs aux comportements des firmes face au choix des ajustements quantitatifs. Ensuite, nous détaillons les opinions sur la fixation annuelle de la TC et sa négociation.

Nous étudions les ajustements quantitatifs des firmes en posant la question : quelle est la réaction de votre firme face au surplus du concentré sur le marché ? Trois réponses sont possibles : espérer une TC plus basse, attendre une TC plus élevée, le niveau de la TC ne va pas affecter le nombre de contrat[27]. Les mineurs déclarent à l'unanimité que le niveau de la TC en raison du surplus ne va pas affecter le nombre des contrats conclus, ils vont donc continuer à produire (graphique 3.6). Les transformateurs s'attendent dans la majorité à une TC plus basse, environ 30% d'entre eux déclarent que le niveau de la TC ne va pas affecter le nombre de contrats conclus. Ces réponses témoignent du peu d'impact que le surplus ou le déficit du concentré aura sur le niveau de la TC future.

Théoriquement, le surplus du concentré sur le marché devrait se traduire par une TC plus élevée car les mineurs vont chercher à écouler le concentré et seront prêts à accepter une TC plus forte. Paradoxalement, une partie des réponses au questionnaire indique plutôt l'espérance d'une TC plus basse dans cette situation ce qui plaide en faveur de la perception de la TC en tant que variable de prix. De plus, seule une partie des firmes (les transformateurs) vont réagir

[26] La TC et l'équilibre de la firme, les ajustements individuels des firmes, l'attitude vis-à-vis de la négociation.
[27] Une option « autre » a été également proposée.

au surplus, en attendant une TC plus basse. En revanche, l'existence du surplus n'est pas une raison suffisante pour que les mineurs modifient les quantités extraites[28].

Nous notons que le point de départ pour les négociations concerne la variation du prix du métal qui touche les mineurs. Le clivage entre les mineurs et les transformateurs résulte de la différence des impacts des évolutions de la TC et du prix du métal sur les profits respectifs. Or, les mineurs vont quand même réagir à une variation de la TC, même si cette réaction ne semble pas être correctement anticipée par d'autres firmes.

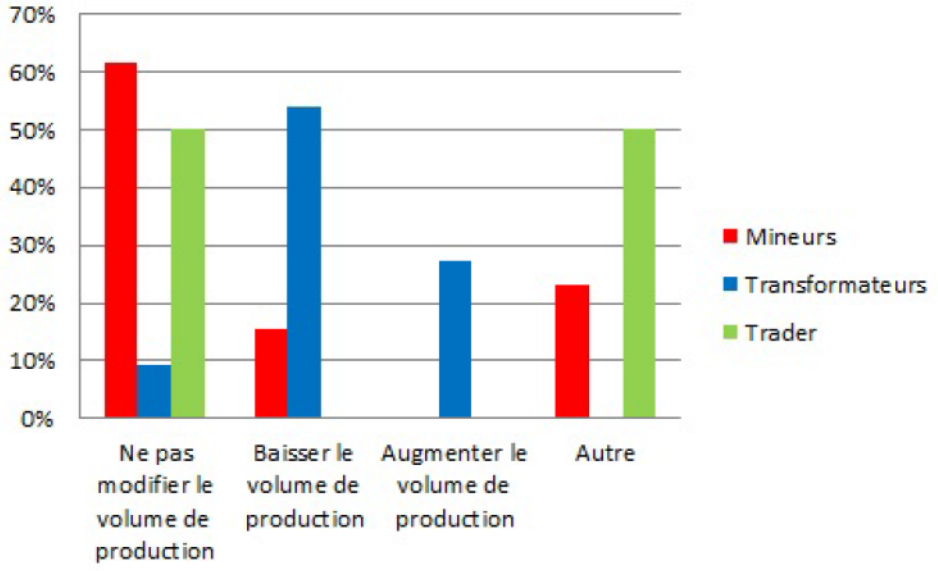
Le graphique 3.7 résume les réponses à la question "Quelle sera la réaction du mineur en cas de hausse de la TC". Les mineurs vont exprimer leur stratégies alors que les réponses des transformateurs traduiront l'anticipation des stratégies des transformateurs. Malgré l'annonce possible des stratégies d'ajustement lors des négociations annuelles les firmes se trompent dans leurs anticipations. Ni les transformateurs, ni les traders ne semblent anticiper correctement les réactions des mineurs. Les mineurs ne semblent pas agir afin de modifier le niveau de la TC insatisfaisant. Ceci s'explique par l'amplitude des réactions possibles dont témoignent les réponses des mineurs. Ces résultats sont similaires aux conclusions de (Lin et Tamvakis, 2010) sur le marché du pétrole dans le cadre des annonces par l'OPEP : l'importance du contexte et la multitude de scénarios possibles. Si on étudie les réponses sans différencier l'activité des firmes, la majorité indique que la réaction des mineurs consisterait à ne faire aucun changement, le second choix serait de réduire le volume de la production (voir figure 3.7).

De la même manière, on étudie les réactions du transformateur à une situation où la TC serait inférieure aux coûts de production (*operating costs*) Parmi les choix de réponse nous proposons deux types d'ajustements quantitatifs visant une réduction ou bien une augmentation du volume traité, un ajustement qualitatif visant une réduction des coûts de transformation et un changement stratégique visant à atténuer les conséquences de la variation de la TC sur le résultat (hedging).

Les réponses témoignent du poids inégal donné aux différentes options par les transformateurs et par d'autres firmes (voir le graphique 3.8). Les transformateurs considèrent les

[28]Le lien entre les stratégies de négociation en cas de surplus est illustré dans Mining Journal (25 janvier 2002). «As a result of the low zinc price, some 40% of the world's zinc is currently being produced at loss, and this has forced a number of companies to close operations. The closures seem to have tipped the concentrates market into deficit and into the miners' favor in the current round of treatment charge negotiations. Last year's benchmark treatment charge for zinc of around 189$/t (price basis 1,000$/t) was essentially a rollover from the previous year, and reflected an oversupply of zinc concentrates in 1999 and 2000, and the consequent buildup of stocks. However, mining companies generally argue that as a result of the mine cutbacks, there is a growing disparity between mined output and zinc smelting capacity. (...) Smelters have responded with the view that the surpluses of previous years have allowed the accumulation of stocks which means that the concentrate market is not as tight as the mining companies may imply".

Graphique 3.7: Réaction en cas de hausse de la TC



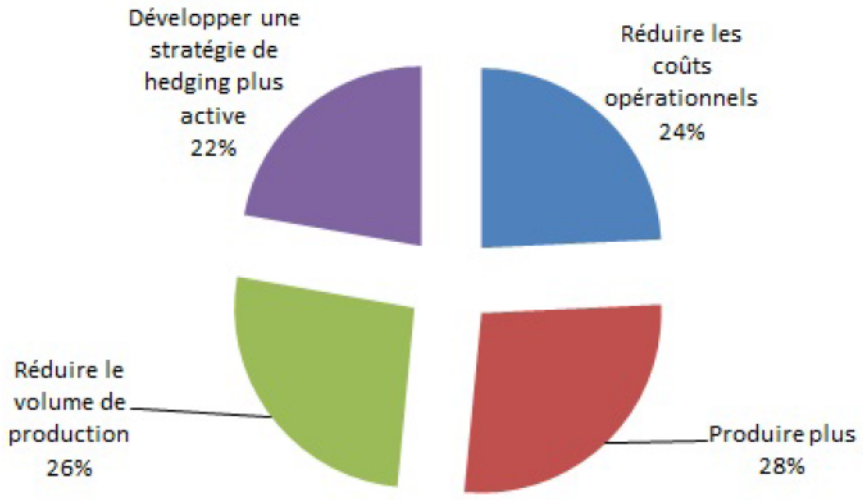
Source : Auteur

ajustements quantitatifs et les ajustements qualitatifs comme des stratégies viables équivalentes. Environ la moitié des réponses traduit la volonté d'effectuer un changement quantitatif de la production (indépendamment du type de cet ajustement : hausse ou baisse). L'ajustement quantitatif reste donc une réaction privilégiée des transformateurs.

Il semble également logique que la réduction des coûts opérationnels ne soit pas une option populaire, car les résultats de cette stratégie se manifestent à long terme : il semble peu justifié d'introduire une stratégie de long terme comme réponse à des fluctuations qu'on peut estimer comme conjoncturelles. On aurait pu obtenir des réponses allant dans ce sens si la question formulée présente une baisse durable de la TC.

Le hedging plus actif, consistant à couvrir systématiquement le risque de prix du métal et celui de la TC, est une option peu mentionnée. On pourrait citer plusieurs raisons à cette situation, principalement la méconnaissance des techniques de hedging de la TC et l'absence des outils de hedging adaptés. Nous comparons les réponses des transformateurs avec celles des autres intervenants, sachant que les autres intervenants ne font qu'anticiper les réactions des transformateurs compte tenu de leurs expériences passées (graphique 3.9). Les solutions quantitatives (ajustement à la hausse ou à la baisse des capacités de production) sont de nouveau considérées comme les plus adaptées. Néanmoins, la piste de réduction du volume du concentré transformé semble être légèrement plus favorisée par rapport à la baisse du volume produit. La stratégie de hedging vient en 3ème position, principalement grâce aux réponses des traders.

Graphique 3.8: Réactions du transformateurs lorsque le niveau de la TC est bas



Source : Auteur

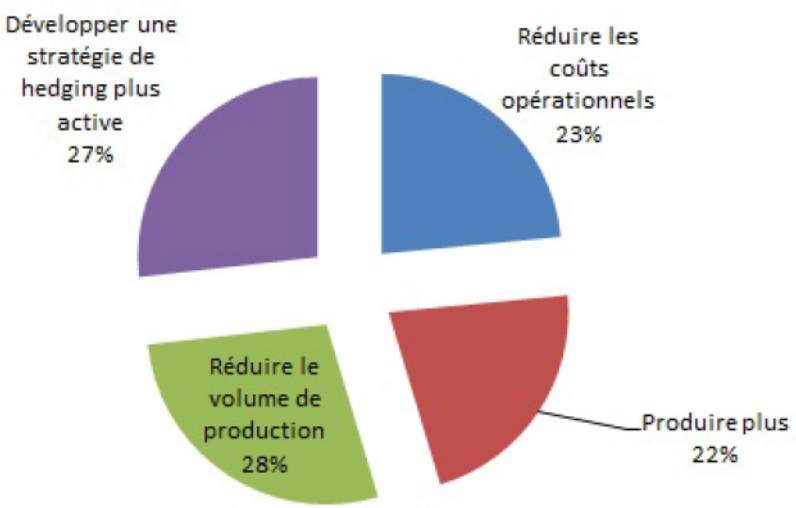
Ce résultat prouve que les firmes basent leurs anticipations non seulement sur la réalité objective du terrain (méconnaissance par les transformateurs des techniques avancées de hedging), mais également sur leur propre expérience. Ce type de situation crée un biais d'estimation observable dans cet exemple. La réduction des coûts opérationnels vient naturellement en tant que solution moins envisageable, sans que son poids soit toutefois négligeable.

L'analyse de cette première partie des réponses nous a confirmé l'existence des clivages en termes de réactions quantitatives des firmes en fonction de leur activité. Les avis des mineurs et des transformateurs divergent fréquemment. Les transformateurs sont plus averses au risque que les mineurs. Le positionnement des mineurs témoigne d'une variété de stratégies plus importantes, alors que les transformateurs semblent être plus conservateurs dans leurs choix. Globalement, les réponses font ressortir les différences en termes d'horizon temporel : les choix des mineurs obéissent à une vision de production de long terme, alors que les décisions des transformateurs témoignent d'une vision à moyen terme.

Nous constatons que ces mêmes divergences entre les mineurs et les transformateurs existent en ce qui concerne l'évaluation du système de TC actuel (graphique 3.10). La question "Quelle est votre stratégie habituelle pour la négociation de la TC" propose trois réponses : négociation pour chaque contrat, négociation pour les contrats importants et négociation uniquement quand la TC est élevée[29]. Les mineurs déclarent négocier la TC pour la totalité des contrats conclus,

[29]Le questionnaire proposait également une réponse « je ne négocie jamais la TC », cette réponse n'a été choisie par aucune personne interrogée.

Graphique 3.9: Anticipations des réactions du transformateurs lorsque le niveau de la TC est bas



Source : Auteur

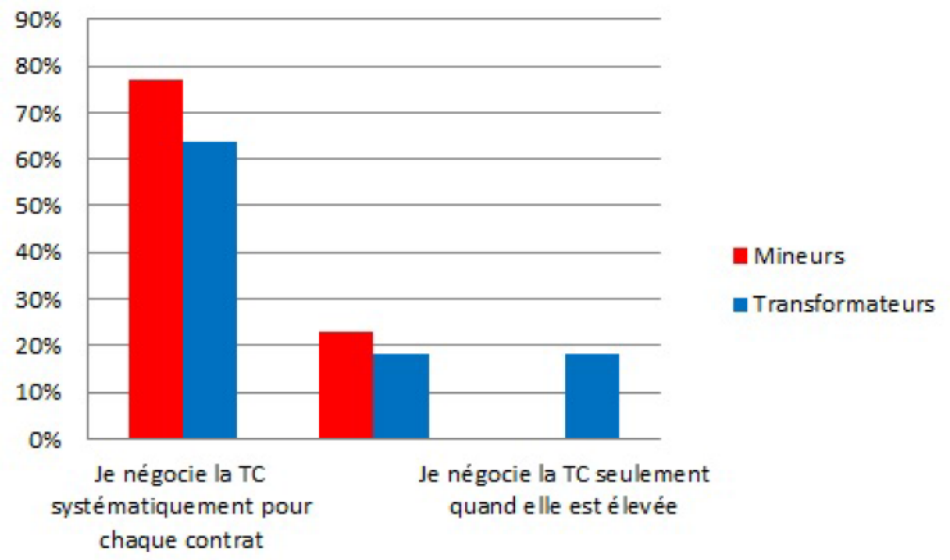
alors que les transformateurs ont une attitude discordante privilégiant plutôt une négociation de la TC lorsqu'il s'agit de situations à fort impact sur le résultat (contrats importants, TC élevée)..

Le positionnement des firmes par rapport à la négociation de la TC varie également en fonction de leur activité. Les mineurs semblent être plutôt en faveur de la TC flexible, négociée à chaque contrat alors que les transformateurs privilégient la TC de référence annuelle. Ces différentes réponses peuvent s'expliquer par une attitude différente vis-à-vis des négociations évoquée précédemment. Les mineurs indiquent toujours négocier la TC et sont favorables à une TC flexible. Cela peut témoigner d'un pouvoir de négociation individuel plus important traduisant une volonté d'imposer des conditions de la TC aux transformateurs.

La mise en évidence de flux commerciaux du concentré en direction de la Chine témoigne également d'une diversification accrue des marchés pour les mineurs. Les transformateurs chinois négocient la TC individuellement à chaque contrat, ce qui peut présenter un avantage pour les mineurs sous certaines situations. Les transformateurs indiquent au contraire préférer la TC annuelle et la négociation pour les gros contrats.

Ces réponses peuvent témoigner d'une atomicité plus importante des transformateurs qui ont besoin de négociations « en groupe » afin de défendre les conditions de la TC. Par ailleurs, une autre explication à ce phénomène résiderait dans la dépendance plus importante des trans-

Graphique 3.10: Attitude vis-à-vis de la négociation de la TC



Source : Auteur

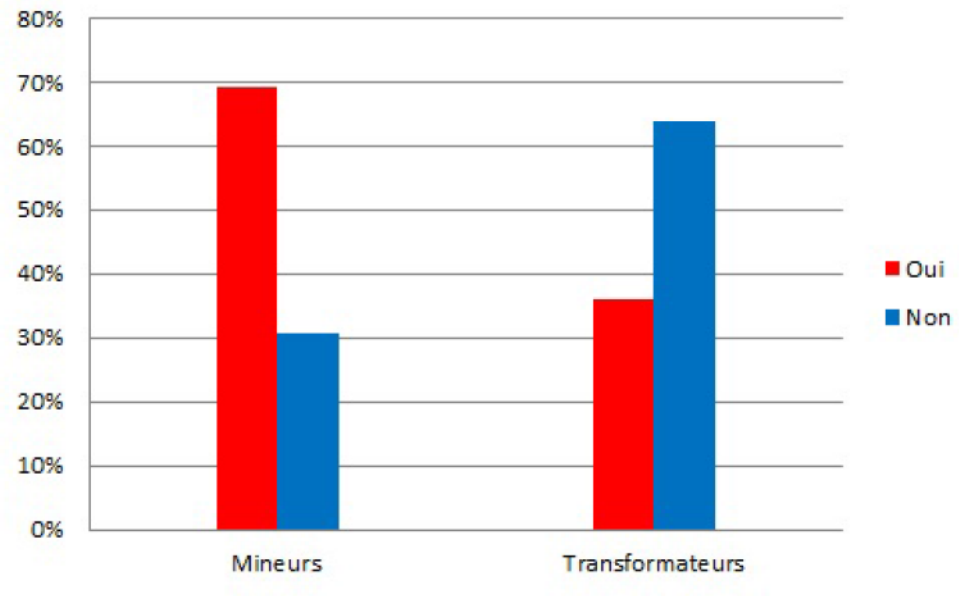
formateurs de la volatilité de la TC et dans la volonté de limiter l'impact de la TC par des négociations régulières, mais pas trop fréquentes (voir le graphique 3.11).

D'une manière générale, les firmes sont partagées sur la question de la fréquence des négociations de la TC. Plus de la moitié des firmes interrogées considèrent celle-ci insuffisante (voir le graphique 3.12). Notons que cette proportion est presque équivalente pour les mineurs et pour les transformateurs, témoignant ainsi de différences au sein des firmes. Donc, malgré les clivages importants entre les mineurs et les transformateurs, certaines problématiques font ressortir des divisions entre les firmes qui ne sont pas dus à leur activité, mais à d'autres facteurs.

On peut supposer l'existence des groupes de firmes plus ou moins homogènes indépendamment du positionnement de ces firmes au sein de la filière. Une partie des mineurs et des transformateurs peut souhaiter une évolution de la TC dans un sens donné ce qui se traduirait par une division au sein des mineurs et des transformateurs. Une évolution de la TC peut donc être imposée par une partie des firmes sur la base d'autres critères que l'activité.

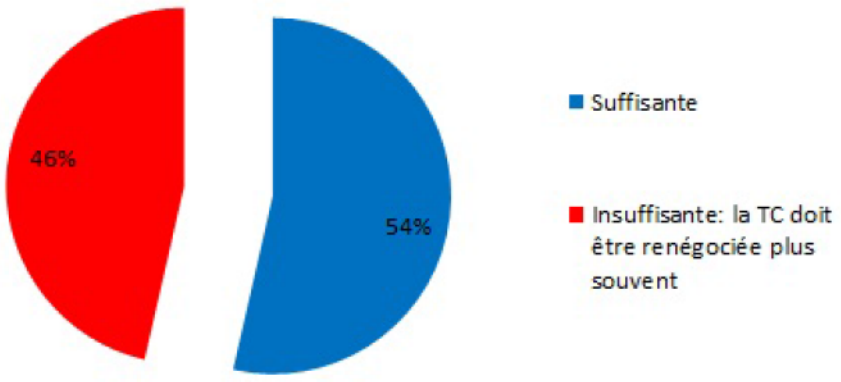
L'étude statistique des réponses nous permet de tirer certaines premières conclusions quant au comportement des firmes et aux objectifs lors des négociations : les firmes réagissent aux changements de la TC et les réactions des transformateurs sont plus fortes que celles des mineurs. Les ajustements en cas de déséquilibre sont réalisées avec prudence (ou même avec une certaine inertie). Les firmes ont du mal à anticiper les réactions des autres firmes compte tenu des options multiples d'ajustement qui peuvent être mis en place. Ce constat rejoint les

Graphique 3.11: Choix entre la TC annuelle et la TC négociée pour chaque contrat



Source : Auteur

Graphique 3.12: Appréciation de la fréquence annuelle des négociations



Source : Auteur

conclusions de Sukagawa (2010) qui souligne que les négociations annuelles sont devenues les négociations de *packages* de prix et de quantités dont l'objectif était d'apporter de la stabilité au marché.

Cette première analyse des clivages par nature d'activité confirme les intérêts polaires des mineurs et des transformateurs. Leurs réactions sont souvent opposées, leur opinions sur la TC sont également antinomiques. Ceci n'empêche pas des convergences entres acteurs de différentes métiers, notamment autour des négociations de la TC. Nous allons maintenant proposer un regroupement des individus et des caractéristiques les uns par rapports aux autres, au lieu de regrouper par les individus par métier.

II.1.2 Les acteurs du marché et la TC : profils

Sur la base de l'échantillon des firmes interrogées, nous cherchons à identifier les profils des firmes en fonction de leur attitude vis-à-vis de la négociation et de l'évolution de la TC. Il s'agit de déterminer si la population est assez homogène ou bien si elle est composée de sous-groupes. Cette démarche nous permettrait de nous prononcer sur l'existence de tensions au sein de la filière quant à l'évolution de la TC.

Ce travail prend en compte les réponses des firmes traitant des négociations, de l'importance de la TC et de questions relatives à la fréquence des négociations de la TC. Nous supposons que certains mineurs vont avoir un comportement qui les rapprocherait davantage de certains transformateurs plutôt que des autres mineurs et inversement. Nous pourrons ensuite associer des caractéristiques au groupe ainsi constitué. La vérification de cette hypothèse est réalisée à l'aide de l'analyse factorielle des correspondances.

De façon à identifier les différents profils des firmes au sein de la filière, nous avons d'abord postulé que ceux-ci se distinguent en fonction de l'attitude vis-à-vis de la TC. Cette attitude peut être résumée selon trois dimensions : stratégie d'ajustement (type de réaction au surplus, à l'augmentation de la TC), facteurs explicatifs de la TC (stock, prix du métal, rapport de force) et vision de la TC (hedging, fréquence des négociations, impact financier)[30].

Les questions relatives à ces trois dimensions ont été introduites dans le questionnaire. Les ajustements des firmes on fait l'objet de questions proposant un choix de réponses sur les réactions des mineurs et des transformateurs. Les facteurs explicatifs de la TC ont été identifiés à l'aide d'une seule question proposant le choix des facteurs explicatifs : offre et demande de

[30] Voir l'annexe II pour le détail des questions.

concentré, stock de concentré, coût de transformation, pouvoir de marché, prix du métal. La vision de la TC est perçue à travers les questions relatives à la négociation de la TC, l'impact de la TC sur les résultats financiers, la couverture de la TC et l'opinion sur la fréquence des négociations annuelles.

L'interprétation des réponses à ces questions se fait à l'aide de l'analyse factorielle qui fait partie des méthodes de statistiques descriptives multidimensionnelles. Ce type d'analyse a l'avantage de fournir une représentation synthétique et claire de variables hétérogènes. Il s'agit d'une analyse exploratoire qui ne nécessite pas d'hypothèses particulières et qui a pour objectif de rechercher des axes de représentation de la variance des données. Le choix de la méthode dépend du type de variables utilisées. Notre choix porte donc sur l'analyse des correspondances multiples (ACM) en raison de la présence des variables quantitatives et qualitatives.

Les pré-requis de l'analyse concernent la nature des variables ainsi que le rapport entre le nombre de variables, le nombre de modalités et le nombre d'individus. La stabilité de la structure factorielle est conditionnée par l'existence d'au moins 5 individus par modalité de variable, ce qui est le cas (Tabachnik et Fidell, 1996). Nous retenons un ratio 2 :1 pour le rapport entre le nombre d'individus et le nombre de variables. Les variables sont transformées en catégories. Une distribution normale des variables est également souhaitable.

Toutefois, une analyse factorielle à des fins exploratoires ne peut être réalisée sans respecter cette règle, tout en tenant compte de la non normalité de la distribution des variables lors de l'extraction (méthode des moindres carrés non pondérés). Nous présentons ici les principaux résultats de cette étude[31].

D'une part, on observe que "l'importance de la TC" et "l'usage du tolling" sont corrélés négativement ainsi que "l'usage du tolling" et "la participation aux négociations". Ce constat met en lumière l'existence de firmes qui n'utilisent peu ou pas du tout la TC. D'autre part, la "négociation de la TC" est corrélée avec la collecte des "informations sur la TC auprès d'autres acteurs du marché et avec "l'utilisation des coefficients de variation pour le profit à court terme". Nous estimons qu'apparaissent ici les firmes qui utilisent activement la TC. Ces résultats suggèrent une différence significative entre firmes utilisant la TC et celles fonctionnant en tolling.

Les corrélations positives entre la "couverture du risque de la TC" et "l'utilisation des coefficients de variation" ainsi que celle entre "le niveau de la TC élevé et "l'utilisation des outils de couverture pour réagir à une TC basse" témoignent de l'existence de firmes armées pour

[31] Les différents tableaux issus du traitement des données dans R (package Factominer) sont fournis dans l'annexe II

Tableau 3.5: Coefficients de corrélation

Variable 1	Variable 2	Coefficient
Importance de la TC	Usage du tolling	-0.6390
Usage du tolling	Participation aux négociations	-0.5591
Couverture du risque de la TC	Utilisation des coefficients de variation pour le profit de court terme	0.5477
Négociation de la TC	Information sur la TC auprès d'autres acteurs du marché	0.5459
Niveau de la TC élevé	Utilisation des outils de couverture pour réagir à une TC basse	0,5431
Importance de la TC pour la firme	Réduction de la production pour réagir à une TC basse	0.5370
Négociation de la TC pour chaque contrat	Surplus du concentré en tant que facteur explicatif de la TC	0,5332
Négociation systématique de la TC	Utilisation des coefficients de variation pour le profit de court terme	-0.5208
Participation aux négociations	Prix du métal en tant que facteur explicatif de la TC	0.5002
Niveau de la TC élevé	Participation aux négociations	0.4950

Source : Auteur

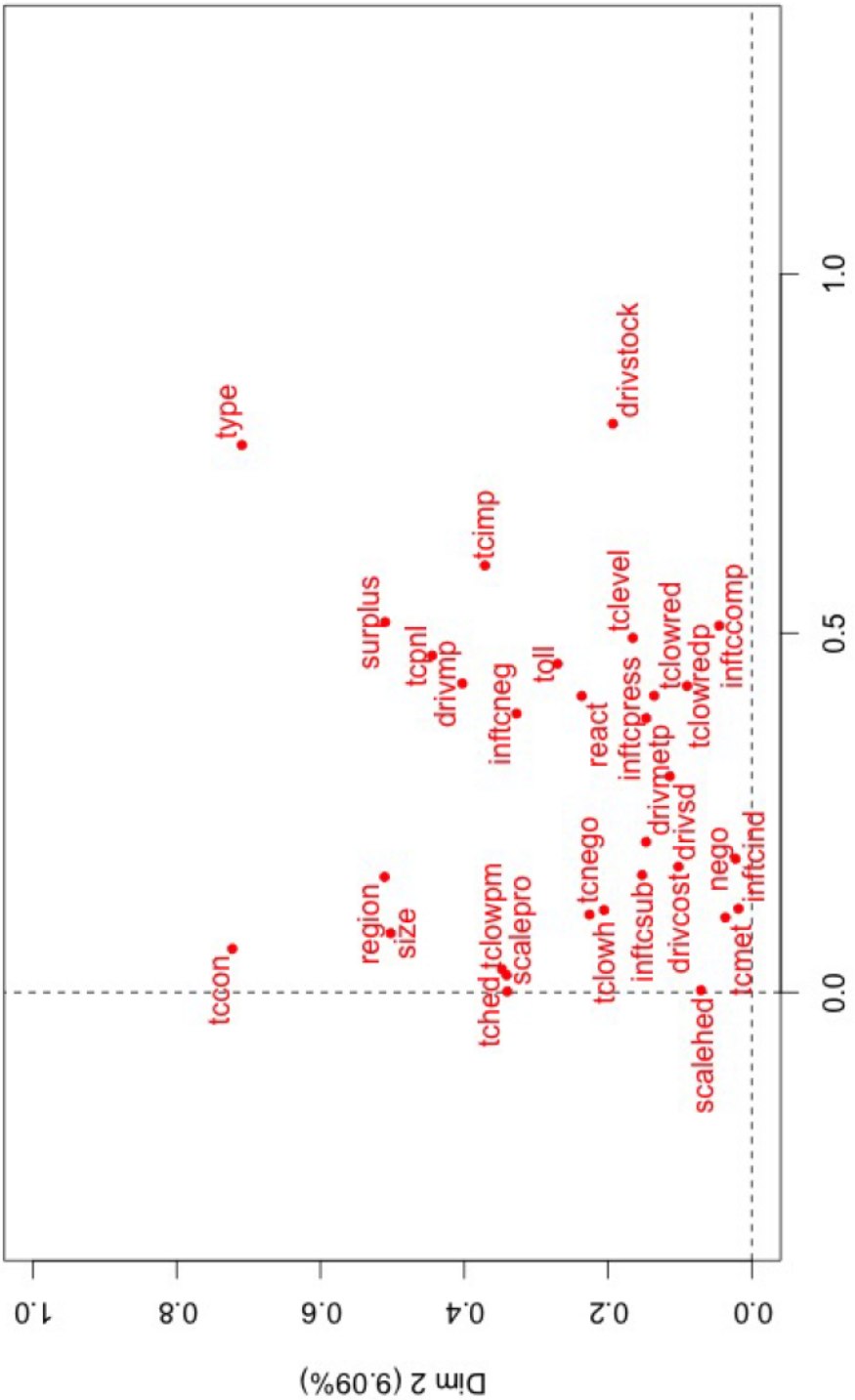
faire face à la volatilité de la TC. Sur la base de ces résultats, nous concluons qu'il existe une hétérogénéité au sein de la population : l'identification des groupes à l'aide de l'ACM est alors possible.

Nous identifions trois dimensions (axes) : la plus grande inertie est restituée par le premier axe, les axes suivants restituent une inertie maximale décroissante. La partie de l'inertie représentée par les axes au déjà du quatrième est assez faible, ce qui nous amène a considérer trois axes principaux. L'ensemble des observations se situe dans le cadrant de corrélation positive (voir le graphique 3.13).

Les trois axes nous servent de base pour la construction de trois groupes de firmes qu'on différencie à partir des caractéristiques observables mises en lumière par l'analyse factorielle.

Les caractéristiques du premier axe sont "l'importance des stocks", "une prise en considération de la TC et d'autres outils de valorisation tels que le *tolling*", "la négociation non systématique de la TC ". La prépondérance des stocks dans l'explication de cet axe correspond à la réalisation des ajustements quantitatifs tels que décrits dans le chapitre 1. Cet axe correspond à la représentation traditionnelle des firmes au sein de la filière, avec une dominante des firmes européennes et des pays développés. Ces firmes acceptent la TC dans l'état et s'adaptent à la TC existante.

Le second axe est défini par les firmes qui ne participent pas directement aux négociations de la TC et qui attendent les opportunités de profit à court terme via les coefficients de variation de la TC. L'activité de trading occupe une place importante dans l'explication de cet axe. Selon nous cet axe correspond à l'exploitation de la volatilité de la TC : nous identifions les firmes intéressées par la volatilité de la TC et qui savent en profiter. Ces firmes utilisent activement les outils de hedging et ont une attitude très active pour la négociation de la TC.



Graphique 3.13: Représentation des variables

Source : Auteur

L'axe trois explique une part plus faible d'inertie, donc les conclusions relatives à la nature de cet axe sont à considérer avec beaucoup de précautions. Les caractéristiques de cet axe sont "le faible impact de la TC sur les profits", "la localisation principalement en Asie" et "l'inertie dans les réactions suite à une modification de la TC". Cet axe décrit le comportement des mineurs et des transformateurs plus passifs, réagissant peu à la variation de la TC, mais capables d'ajustements quantitatifs si besoin. Selon nous, cet axe correspond au comportement des firmes peu dépendantes de la TC (ex. firmes chinoises, firmes fonctionnant en *tolling*). Le clivage entre les firmes chinoises et les firmes du reste du monde est de plus en plus prononcé (voir l'encadré 3.1).

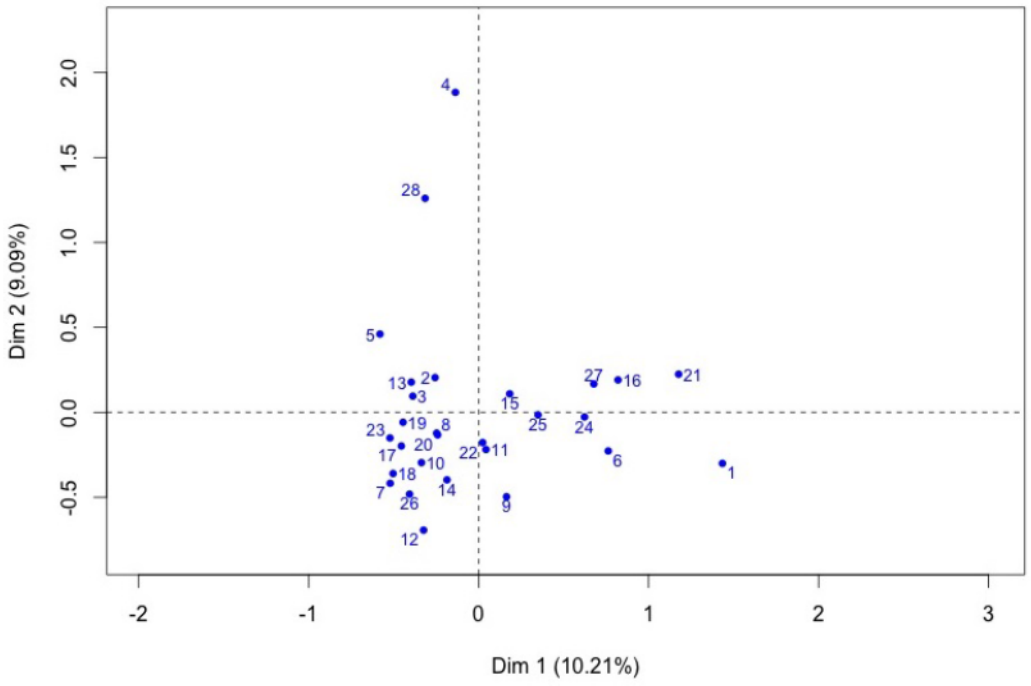
Encadré 3.1: Fixation du prix

Selon un mineur canadien « le marché est très divisé entre les contrats à long terme conclus par les transformateurs et les mineurs non-Chinois qui font des transactions à l'aide de la TC annuelle et les contrats ponctuels pour la vente du concentré, principalement en Chine. Les deux segments du marché fonctionnent différemment et à un prix différent. La Chine représente 40% de la capacité mondiale de la transformation et n'utilise pas la TC de base (uniquement la TC spot) ».

Ce clivage est apparu progressivement et il résulte d'une concordance de plusieurs facteurs. Les mineurs et les transformateurs chinois sont historiquement de plus petite taille que leurs concurrents européens ou américains. En raison de la règlementation financière et du risque contractuel élevé lors des transactions avec les clients chinois, les contrats spot ont été préféré aux contrats de long terme. Par ailleurs ce type de contrats permettait un paiement à l'avance ou bien au moment de la livraison du concentré évitant ainsi un risque de contrepartie lors de la transaction avec les firmes chinoises. L'emergence de la Chine en tant que principal producteur du concentré et en tant qu'acheteur important de métal a juste approfondi ce clivage. Pour autant aucune solution n'a été trouvé pour pallier aux différences de valorisation entre ces deux types de contrats. Cette dynamique d'évolution signifie que la conclusion des contrats avec les firmes chinoises influence les attentes des participants de marché à l'égard d'une TC plus flexible, voir une TC spot.

La représentation des firmes en nuage de points (Graphique 3.14) fait ressortir l'existence d'un groupe de firmes assez homogène qui se trouve au centre. Ces firmes se distinguent par l'absence de valeurs extrêmes associées aux axes étudiés. Selon nous, il s'agit d'un groupe peu actif qui représentent un "comportement de base" relativement passif vis-à-vis de la TC et des négociations de la TC. Ces firmes procèdent à peu d'ajustements et considèrent que le niveau de la TC répond plus aux facteurs exogènes qu'aux facteurs endogènes à la filière. Le nuage de point est fortement étiré le long de l'axe des abscisses. L'étirement le long de l'axe des ordonnées tient à quelques firmes très éloignées et la distorsion du nuage des points central selon l'axe 2 reste assez faible.

Graphique 3.14: Représentation des observations par individu



Source : Auteur

L'identification de ces trois axes permet de distinguer quelques groupes disparates au sein des firmes de la filière. Sur la base de l'attitude vis-à-vis de la TC, de sa volatilité et des ajustements réalisés nous identifions trois groupes. Ces comportements différents dépendent peu de l'activité des firmes (mineur ou transformateur) et traduisent plutôt une différence de leurs stratégies de production et de hedging. Sur la base de ces trois groupes nous construisons les "profils" des firmes. Il s'agit d'une construction hypothétique car nous considérons que les regroupements identifiés correspondent à la répartition de la totalité des firmes de la filière. Nous faisons l'hypothèse de la stabilité de comportement des firmes de chaque profil[32].

Trois "profils types" d'intervenants sur le marché sont identifiés : - Le premier profil correspond aux acteurs dit "traditionnels". On y trouve les transformateurs et les mineurs satisfaits par la TC dans sa formule actuelle et dont l'activité ne s'éloigne pas de leur cœur de métier.

- Le second profil correspond aux firmes dites "diversifiées". On y trouve principalement les traders et les firmes misant sur une diversification verticale et horizontale de leurs activités. Ces acteurs négocient activement la TC, utilisent des outils financiers pour bénéficier de l'évolution de la TC et souhaitent une TC plus proche d'un prix de marché.

[32]Cette hypothèse est peu réaliste compte tenu des modifications fréquentes dans la stratégie des firmes lors du changement des dirigeants ou en réponse à l'évolution de l'environnement productif.

- Le troisième profil regroupe des firmes très peu dépendantes de la TC, le profil "hétérodoxe". On y trouve principalement des transformateurs fonctionnant en *tolling* ou des transformateurs chinois qui n'appliquent pas la TC *benchmark*.

Nous venons de démontrer que les firmes de la filière diffèrent non seulement en termes de l'activité mais également sur la base de leur vision de la TC et de l'attitude par rapport au niveau et à la volatilité de la TC. Cette analyse valide les résultats de nos hypothèses de travail sur les clivages existants et à venir au sein de la filière. Les profils identifiées permettent d'anticiper une division plus nette entre les firmes sur la base du critère de la TC. L'activité devient un critère moins important que l'avis des firmes sur le *status quo* dans la filière. Le fait d'être un mineur ou un transformateur correspond à un clivage plus faible que celui de la vision de la TC.

L'identification de ces profils types sert de point de départ pour la discussion sur le devenir de la TC en réponse aux chocs endogènes de la filière. Nous avons identifié que ces trois types de firmes ont une attitude différente vis-à-vis de la TC. Nous faisons une projection de la volonté de changement (ou d'absence de volonté de changement) de la TC par ces firmes. Afin de proposer les scénarios de l'évolution future de la TC nous devons identifier quelle évolution (ou absence d'évolution) de la TC serait souhaitable à chaque type de firmes.

Le premier profil est satisfait par la TC actuelle, mais subit les conséquences de sa variation. Nous estimons que la volatilité de la TC est la clé pour comprendre les souhaits de ce groupe de firmes : le partage du profit se trouve modifié sous l'impact de la volatilité de la TC indépendamment de la volonté de ces firmes. Nous estimons que la meilleure projection de la volonté de ce groupe correspondrait à une réduction de la volatilité de la TC visant un partage du profit plus équitable et une coordination renforcée. Les souhaits de modification de la part payable du métal (pour limiter l'exposition du transformateur au prix du métal) et la réduction des coefficients de variation de la TC semblent être deux principales préoccupations de ce groupe. L'utilisation d'une TC fixe correspond également à une option dont ce profil peut souhaiter l'application.

Le second profil est moins affecté par la volatilité de la TC, car il sait en profiter en déployant les outils de hedging et en misant sur les stratégies de court terme. Selon nous, ce groupe est plutôt insatisfait par les rigidités actuelles de la TC et souhaiterait aller vers plus de concurrence grâce à l'application d'une TC plus flexible et volatile. Les firmes de ce groupe misent sur leur savoir faire pour obtenir le profit plus élevé suite à cette modification.

Le troisième profit est peu affecté par la TC en raison d'une faible exposition à la TC négociée. Selon nous, une partie des firmes de ce groupe fonctionne sur la base du *tolling*, ces firmes

ne sont pas exposées à la variation du prix du métal ni de la TC, leur coûts de production sont couverts par le revenu du *tolling*. Une autre partie des firmes de ce groupe n'applique pas la TC. Il s'agit des firmes chinoises qui utilisent la TC journalière chinoise, dont les variations sont décorrélées de celles de la TC négociée. Nous estimons que ce groupe ne cherche pas à utiliser la TC négociée et souhaite préserver son fonctionnement actuel. Néanmoins, compte tenu du fait que ces firmes absorbent une partie du flux de concentré, leur activité peut causer un déséquilibre quantitatif de la filière de zinc utilisant la TC négociée et ainsi, menacer indirectement l'organisation de la filière.

Sur la base des projections détaillées ci-dessus nous obtenons trois scénario potentiels du développement futur de la TC et des outils du contrat de concentré. Il s'agit de la modification de la part payable du métal, de la poursuite de la réduction des coefficients de variation de la TC et de l'utilisation d'une TC plus variable à l'opposition de la TC fixe. Ces modifications vont impacter l'organisation de la filière via les canaux de transmission exposés plus haut. Nous étudions l'impact des changements sur la stabilité de la filière en détaillant la manière dont ces changements affectent les profits respectifs des firmes et la coordination entre elles.

II.2 Les évolutions à venir de la TC et du contrat de concentré

Nous venons d'identifier trois profils de firmes sur la base de leurs réactions, de l'importance accordée à la TC et de leur comportement face aux contraintes du marché. Ces trois groupes de firmes nous servent de grille de lecture pour analyser les changements endogènes de la filière. Après les trois modélisations présentant les évolutions récentes au sein de la filière, nous proposons ici des scénarios prospectifs liés à l'évolution de la TC et du contrat de concentré. Nous procédons à la comparaison entre la TC fixe et la TC variable pour juger des différences de profit obtenus par les firmes dans les deux cas. Cette comparaison est effectuée pour illustrer l'intérêt de chacune des solutions et ainsi justifier la divergence des avis des mineurs et des transformateurs sur le sujet.

Nous complétons cette analyse par la modélisation des souhaits des firmes relatifs à la volatilité de la TC (réduction des coefficients de variation de la TC) et de l'exposition du transformateur au risque du prix du métal (modification de la part payable). Dans la plupart des cas, la volonté de changement d'un paramètre donné exprimé par un groupe de firmes rencontre l'opposition d'un autre groupe. Les acteurs souhaitent des évolutions sur la gestion de la volatilité de la TC, la fréquence des négociations et la part payable du métal dans le concentré. Ces évolutions auraient un impact fort sur l'organisation de la filière, qui accentuent les clivages entre les groupes : gagnants et perdants sont inévitables, mais diffèrent selon les

évolutions considérées.

II.2.1 Pourquoi les firmes estiment qu'une évolution de la TC est nécessaire ?

Le principe de l'utilisation de la TC n'est pas remis en question, mais elle est de plus en plus critiquée dans sa forme actuelle. Nous présentons dans cette section les principales critiques du contrat du concentré issues du questionnaire et de la presse écrite.

La TC : trop "rigide" dans un contexte de forte volatilité

Le système actuel de valorisation du concentré a été crée dans les années 60 et il n'a pas subi de changements majeurs depuis. Les fluctuations plus amples de la TC au cours des dernières années se sont répercutées d'une manière inégale sur le profit des firmes intervenant dans les transactions avec le concentré, ce qui a conduit à une réflexion plus globale sur le caractère adapté du système de valorisation historique aux enjeux du marché actuel[33]. Nous avons déjà amplement commenté plus haut les raisons de cette volatilité, nous la prenons ici comme donnée afin de recenser les ajustements demandés par les industriels pour la contrer.

Une première conséquence de cette volatilité accrue de la TC est de rendre les comportements stratégiques individuels des firmes plus manifestes. Les ajustements sur le marché du concentré ont été principalement décidés par les mineurs jusqu'à une date récente[34]. Ils procédaient aux ajustements suite à l'évolution du prix du métal. Lorsque le déséquilibre sur le marché du concentré devenait important, les négociations annuelles de la TC définissaient l'ajustement des transformateurs en fonction du niveau de la TC.

On assiste maintenant à des ajustements quantitatifs fréquents de la part des transformateurs. Ces derniers agissent dans le but de s'assurer une TC plus favorable lors des négociations. Les transformateurs vont ainsi négocier la TC en fonction de leurs coûts de production respectifs et de l'état de leurs capacités de production (taux de remplissage). Les transformateurs ont donc adopté un comportement plus actif dans les négociations et n'hésitent pas à être les premiers à procéder aux ajustements quantitatifs pour assurer une TC favorable lors des négociations.

Ce changement de paradigme intervient alors que les mineurs sont affaiblis dans les négociations par un prix du métal faible, à la limite du seuil de rentabilité de certaines mines. Dans le

[33] "Zinc miners and smelters likely will stick to benchmark treatment charges (TCs) agreed to last month, despite some rumblings that the current yardstick should give way to a more variable method that more closely reflects prices on the spot market" (Metal Bulletin, 04 mars 2009).

[34] Entretien avec Chris Parker, analyste zinc, Brook Hunts, avril 2014.

cadre des études de faisabilité et de la rentabilité d'exploitation, préalables à l'ouverture d'une mine, on applique des modèles de prévision de la capacité de production minière et du profit potentiel. Le calcul du profit se fait généralement en se basant les anticipations du prix futur du métal (voir Shafiee *et al.* (2009) pour une revue des techniques de valorisation des projets miniers). Si le niveau de prix sur le marché est trop bas, de plus en plus de mines voient leur rentabilité baisser, on assiste alors à des mouvement de fermetures partielles ou totales (voir chapitre 2, section II graphique 2.6).

Plusieurs issues s'offrent au mineur : attendre que les concurrents moins rentables ou financièrement moins sains ferment, ce qui aura pour conséquence le retour à un niveau de prix plus élevé, réduire le coût de production par la hausse des quantités produites en situation d'économies d'échelle croissantes, produire d'autre type de concentrés (par exemple, le concentré de plomb au lieu du concentré de zinc pour les mines polymétalliques) et enfin fermer partiellement ou totalement de la mine. Quelle que soit la solution retenue, l'offre de concentré est excédentaire jusqu'à ce que l'ajustement par les prix ou les quantités se fasse.

Ce changement structurel dans le rapport de force et l'indépendance prise par les transformateurs mets à mal la coordination dans la filière. Sans surprise par rapport à nos résultats, cela rend le maintien de la TC plus difficile dans sa forme actuelle. Un certain nombre d'éléments du contrat du concentré se trouvent de façon concomitante remis en question comme obsolètes et/ou non adaptés. Les mineurs, surpris par les ajustements des transformateurs, souhaitent reprendre la main en faisant évoluer la TC.

La réalité du terrain fait ressortir les différences entre les firmes liées à leur localisation. Les firmes transformatrices diffèrent en termes de taux de recouvrement, alors que les mineurs ne sont pas égaux devant le contenu métallique. Ces caractéristiques de production sont pleinement ou partiellement maîtrisées par les firmes et peuvent constituer une base de négociation pour une TC plus favorable. Les industriels souhaitent que ces éléments soient également considérés lors des négociations.

Selon un transformateur mexicain[35] « La TC de base guide l'industrie qui s'est progressivement spécialisée par zone géographique et par type de concentré : purs, pas purs, avec un contenu différent en or et en argent, etc. Différents systèmes de valorisation devraient exister en fonction de ces facteurs ». L'évolution possible suggérée passerait donc par une refonte du système de valorisation en limitant les pénalités et en élargissant les limites du contenu métallique du concentré standard.

[35]Qui a souhaité garder l'anonymat.

La fréquence annuelle est régulièrement remise en cause par les mineurs (en particulier par Teck Cominco) qui prennent exemple sur le marché du minerai de fer où les prix sont fixés sur une base trimestrielle. Le risque de contrepartie a été évoqué comme facteur justifiant le changement du système de valorisation actuel plaidant en faveur des négociations plus fréquentes. Néanmoins, selon notre enquête, il n'y a pas de consensus quant à la nécessité d'accroître la fréquence des négociations, notamment en raison des difficultés de réunir les participants au même endroit et au même moment plus d'une fois par an.

La demande d'une négociation plus fréquente de la TC traduit le souhait de considérer les changements quantitatifs au sein de la filière et non pas les évolutions du prix du métal dont atteste la réduction des coefficients de variation. Ainsi, une TC négociée plus souvent est considérée comme un outil plus transparent et prévisible que l'utilisation critiquée des coefficients de variation[36].

Les demandes d'évolution du système actuel que nous venons d'évoquer manquent de vision globale des contraintes de la filière. Les différences en termes de localisation des firmes, d'hétérogénéité du concentré, de techniques de production semblent expliquer une vision différente des évolutions de la TC, ces différences correspondent aux contraintes de la filière. Pourtant, ces mêmes contraintes existaient au moment de la mise en place de la TC. Ce qui a changé depuis, c'est la prise en compte de la globalisation dans les stratégies des firmes. La spécialisation des firmes, les opportunités de transaction à court terme, les déséquilibres quantitatifs forts entre les régions définissent de nouveaux besoins des firmes auxquels la TC ne répond que partiellement. Les mineurs sont pressés de reprendre le contrôle sur les ajustements quantitatifs de la filière, ce qui explique l'insistance des demandes de l'évolution de la TC.

La continuité des mécanismes traditionnels par la réforme

A côté de cet appel global à rapprocher la TC d'un véritable prix de marché, on trouve encore une majorité pour soutenir le système actuel. Dans le cadre d'une filière coordonnée, la solution négociée consistant à compenser les pertes par une TC plus élevée a encore des adeptes. Ce type d'entraide entre les firmes de la filière se maintient malgré les clivages constatés entre les firmes de la filière. De nombreuses firmes nous ont signalé que l'évolution du système de valorisation devrait le rendre plus flexible et plus proche de la "réalité du marché".

Une première critique concerne l'excès de coordination produit par la forme des négociations actuelles. Les firmes interrogées ont souligné un changement dans les négociations où le souci de coordination quantitative passe avant le souci de profitabilité. Selon Jay De Zeeuw, consultant

[36] "According to the London-based analyst, escalators included in the benchmark system allow for "some wiggle room" by modifying TCs based on changes in zinc prices" Metal Bulletin (04 mars 2009).

d'Euromin, les négociations actuelles ne concernent plus uniquement la négociation de la TC, mais également la négociation des volumes de concentré produit et transformé.

Naturellement, cette évolution des négociations rapproche le marché du concentré d'une industrie verticalement intégrée où les critères de prix et de quantité sont pris en compte simultanément. Les intervenants individuels ont donc de moins en moins de liberté dans la prise de décisions, mais ils bénéficient de la négociation globale (cas des firmes peu efficaces). Peu de firmes sont satisfaites des résultats de cette négociation du fait de l'impossibilité de valoriser la rareté (en termes de composition ou de localisation du concentré).

Plusieurs industriels évoquent le besoin d'une plus grande flexibilité de la TC. La principale raison évoquée concerne l'écart entre la TC réalisée et la TC chinoise (TC négociée au cas par cas pour les contrats de vente en Chine)[37]. Lorsque la TC chinoise dépasse la TC réalisée, certains industriels vont jusqu'à dénoncer les contrats et payer les pénalités associés.

L'activité des firmes au sein de la filière doit également être revue. Le positionnement actuel des transformateurs est source de critiques relatives à la composition de leurs revenus et à l'absence de transparence sur la profitabilité réelle du secteur. Selon un négociant américain, le fonctionnement des transformateurs implique une gestion du risque de prix, il convient donc de dissocier ce risque de prix du métier de transformation afin que « le métier de transformateur redevienne le métier de transformation et non pas de gestion du risque ». Cet argument offre une vision complémentaire du phénomène de 'free metal' et des problématiques de la volatilité du prix du métal. Notamment, il met en évidence, outre le caractère spécifique de l'industrie de zinc, une tendance de plus long terme visant à redéfinir les spécialisations des firmes intervenant à différents étapes de la filière de production du zinc.

Selon un négociant européen[38] « le niveau du zinc payable dans le concentré du zinc est trop bas ce qui donne aux transformateurs le « free zinc » c'est-à-dire, une exposition au risque de prix. Les transformateurs ne devraient pas avoir d'exposition au risque de prix cas il font partie de l'industrie de transformation. La part de zinc payable devrait augmenter jusqu'à 95% et la TC devrait être fixe (stationnaire), couvrant le coût de la transformation. Ceci permettrait d'éliminer les transformateurs non-efficaces et rendre l'industrie plus efficace dans sa globalité (comme ceci a été le cas dans l'industrie de cuivre) ».

[37] Les informations sur le niveau de la TC chinoise sont publiées dans Metal Bulletin. Il s'agit des fourchettes de fluctuation établies sur la base d'un certain nombre de contrats dont les contractants ont révélé les informations à Metal Bulletin. Ainsi, l'évocation de la TC chinoise par les industriels de la filière du zinc est à considérer avec prudence, car on ne peut pas généraliser la TC utilisée dans certains contrats à la totalité des contrats conclus. Les valeurs de la TC chinoise que nous pouvons trouver correspondent effectivement à un benchmark de la TC en Chine.

[38] Notre interlocuteur n'a pas souhaité que son nom soit cité.

Cette partie nous a permis de lister les principaux souhaits des firmes relatifs à l'évolution de la TC. Nous avons établi que la volatilité accrue de la TC et les évolutions des comportements des firmes créent un terrain favorable pour faire évoluer la TC. Il s'agit d'apporter plus de flexibilité à la TC par un lien plus étroit avec le prix du métal ou bien par le biais des négociations plus fréquentes.

Or, les négociations de ces évolutions se heurtent à une difficulté majeure, celle des impacts très disparates des changements demandés sur le niveau de la TC et, respectivement, sur les profits des firmes concernées. Globalement, comme le montrent les résultats de notre questionnaire, les transformateurs recherchent plus de stabilité dans les mouvements de la TC alors que les mineurs souhaiteraient une plus grande flexibilité dans la négociation de la TC. 69% des mineurs préfèrent négocier la TC pour chaque contrat contre seulement 36% dans le cas des transformateurs.

Si toutefois l'évolution de la TC n'est pas possible dans l'immédiat la modification de la part payable du métal et des coefficients de variation semblent être le "second best" pour les firmes de la filière. Nous proposons donc la modélisation de ces évolutions futures en trois scénarios : comparaison de la TC fixe et de la TC variable, réduction de la part payable du métal et modification des coefficients de variation de la TC. Ces impacts sont étudiés à l'aide du modèle théorique développé dans le chapitre précédent. Cette étude nous permettrait de juger des conséquences des évolutions demandées sur l'équilibre de la filière et les profits individuels des firmes.

II.2.2 Les scénarios possibles d'évolution

Dans cette partie nous cherchons à modéliser les impacts sur l'équilibre de la filière qu'entraineraient les modification de la TC et du contrat du concentré demandés par les firmes. Nous procédons d'abord à une comparaison des deux cas polaires de la TC : TC fixe et TC variable pour identifier à qui profiterait chacune de ces situations. Nous modélisons ensuite les changements du contrat du concentré qui nous semblent être les évolutions les plus probables à moyen terme : la modification de la part payable du métal et le resserrement des coefficients de variation de la TC.

TC fixe versus TC variable

La discussion sur les méthodes de valorisation du concentré via la TC indexée sur le prix du métal reste intense. Les uns défendent que la TC indexée sur le prix du métal permet à deux types de firmes de profiter des fluctuations des prix. D'autres soulignent que la TC fixe

pourrait permettre de structurer le marché différemment avec une introduction du 'prix de la transformation' représentant le prix payé pour l'opération de la transformation. Les mineurs que nous avons interrogés indiquent que la formule de valorisation est devenue obsolète, ils demandent une modification des termes de la valorisation.

L'usage de la TC fixe et de la TC variable sont deux solutions différentes en termes d'impact sur le revenu des firmes sur le marché, ce que nous allons démontrer dans le scénario suivant en faisant varier le prix du métal. C'est bien le revenu des variations du prix du métal que les firmes essaient de s'accaparer en proposant une TC variable.

La TC fixe correspond à un prix unique ne contenant pas de coefficients de variation. Le profit du mineur est donc plus élevé lorsque la TC est fixe, ces acteurs sont logiquement favorables à cette solution. Notre questionnaire confirme cette anticipation avec 70% des mineurs interrogés souhaitant une TC fixe et seulement 35% des transformateurs se prononçant pour cette solution. Cette différence d'attitude illustre bien les tensions entre les différentes professions de la filière. L'évolution de la TC vers une TC fixe a été simulée à l'aide de notre modèle (Tableau 3.6 et Graphique 3.15). La TC variable correspond à la TC actuelle qui varie sous l'impact des coefficients de variation.

Tableau 3.6: Profits unitaires des firmes selon le type de TC

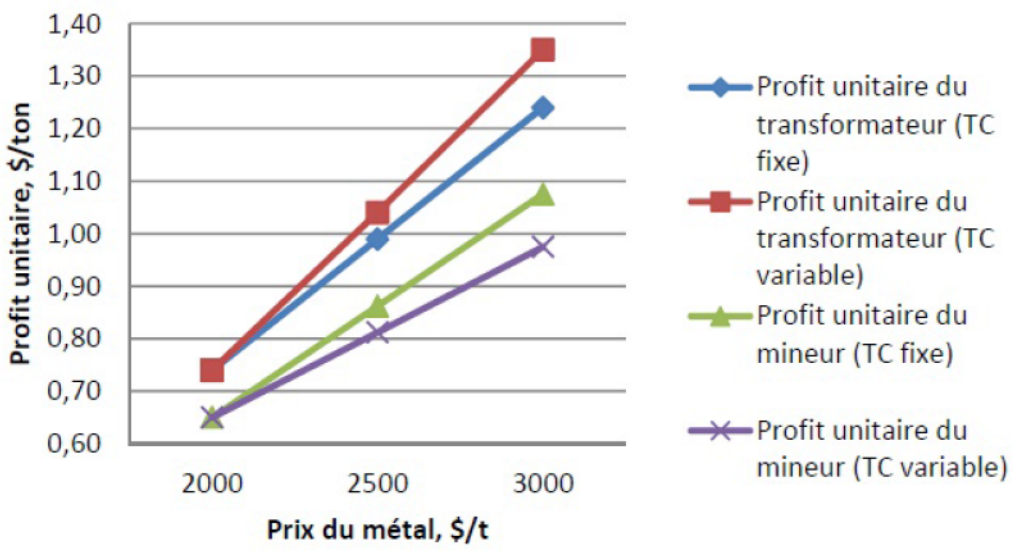
Prix du métal	2000 USD		2500 USD		3000 USD	
	TC variable	TC fixe	TC variable	TC fixe	TC variable	TC fixe
Mineur	0,65	0,65	0,81	**0,86**	0,98	**1,08**
Transformateur	0,74	0,74	**1,04**	0,99	**1,35**	1,24

Source : Auteur

La TC variable permet aux transformateurs d'augmenter le profit en bénéficiant de l'augmentation du prix du métal. A l'inverse, les mineurs ont un niveau de profit plus élevé avec la TC fixe, car ils ne partagent pas le profit de la variation du prix du métal avec les transformateurs.

Les transformateurs traditionnels peuvent compter sur cette question sur le soutien des firmes diversifiées, qui souhaitent une TC plus flexible encore et disposent d'outils pour tirer profit de cette flexibilité. Il y a donc trois positions concernant la TC sur une échelle de flexibilité, des mineurs qui veulent une TC fixe aux acteurs diversifiés qui souhaitent un TC fonctionnant comme un prix de marché. Parmi les évolutions de la TC envisagées figure la création d'une liste de TC différentes pour tenir compte de la valeur différente associé à certain types de concentré. De cette manière la TC pourrait se rapprocher davantage d'un prix de marché.

Graphique 3.15: TC fixe et TC variable



Source : Auteur

Malgré les avantages de l'utilisation d'une TC flexible, la coordination de la filière et l'usage des contrats de long terme peuvent être mis en difficulté dans ce contexte. Les risques liés à la gestion des flux matière augmentent avec l'usage de la TC variable. Ce constat est illustré par l'application de la TC chinoise dans le cadre des contrats spot. La différence entre la TC de base et la déduction appliquée sur le marché chinois (dite "TC chinoise") pousse les mineurs à réduire les quantités allouées aux partenaires traditionnels pour garder une partie de leur production en réserve pour le marché chinois. Certaines firmes vont jusqu'à dénoncer les contrats en cours préférant payer les pénalités d'annulation (Skeet et Santis, 2013) et procéder à des arbitrages sur la TC [39]. Ce comportement accentue les déséquilibres quantitatifs dans les échanges de concentré et exacerbe les tensions entre les acteurs traditionnels.

Evolution de la part payable du métal

L'exposition des transformateurs aux fluctuations du prix du métal est assez discutable. Cette exposition leur procure un revenu complémentaire, mais elle représente également une source potentielle de pertes si le prix du métal baisse. Selon un négociant européen « le niveau du zinc payable dans le concentré du zinc est trop bas, ce qui donne aux transformateurs le « free zinc » c'est-à-dire une exposition au risque de prix. La part de zinc payable devrait augmenter jusqu'à 95% et la TC devrait être fixe (stationnaire), couvrant le coût de la transformation. Ceci

[39] A titre d'exemple, la TC spot chinoise fluctuait en 2009 entre 155 eur/t et 220 eur/t, alors que la TC benchmark était de 195 eur/t (ANTAIKE, 2011).

permettrait d'éliminer les transformateurs non-efficaces et de rendre l'industrie plus efficace dans sa globalité (comme ceci a été le cas dans l'industrie de cuivre)». Nous remarquons à nouveau que ces changements dans l'industrie de cuivre ont été imposés par un nombre restreint des firmes avec un pouvoir de marché important, suivant leur propre intérêt.

Nous explorons l'impact de la modification de la part payable du métal. Ce scénario cherche à identifier l'impact de cette modification sur la TC à travers la réduction de l'exposition du transformateur au risque de prix du zinc. Nous faisons varier la part du métal payable en la passant des 85% appliqués actuellement aux 99% qui correspondent au taux de recouvrement en vigueur sur le plan technique.

Les résultats des simulations sont fournis dans le tableau 3.7. Une baisse de la part payable du métal impliquerait une hausse de la TC pour compenser l'absence du revenu issu de 'free metal'. Cette modification aura pour conséquence une augmentation de la demande de concentré et de l'offre du métal. Le prix payé lors de l'achat du concentré devient plus élevé en raison de la prise en compte d'une part du métal payable plus importante. Lorsque la part payable passe à 1% le profit unitaire des transformateur diminue de 25% alors que le profit unitaire des mineurs grimpe de 15%.

Tableau 3.7: Variation de la part du métal payable

Part du métal payable	85%	90%	95%	99%
Evolution		*6%*	*6%*	*4%*
TC	200	204	208	211
Prix du métal	2500	2448	2400	2365
Prix résiduel	812	851	890	920
Offre/demande du concentré	3500	3549	3596	3634
Offre/demande du métal	2975	3017	3057	3088
Profit unitaire du transformateur	1,04	0,95	0,85	0,78
Profit unitaire du mineur	0,80	0,85	0,89	0,92

Source : Auteur

Ce scénario suppose que les mineurs disposent d'un pouvoir de marché important leur permettant de renégocier les termes du calcul du prix résiduel. L'augmentation du prix résiduel semble très impressionnante en comparaison avec la faible hausse de la TC : une augmentation de la part payable du métal est un changement largement pénalisant pour les transformateurs.

Modification des coefficients de variation de la TC

La baisse historique des coefficients de transformation s'accompagne de l'utilisation plus fine de ces outils, contenant plusieurs paliers. Associés à un prix du zinc de 200 $/t et à une TC de base de 223.50 $/t, les coefficients de variation pour l'année 2014 ont été fixés par tranche de prix : 8,5% pour un prix entre 2000 $/t et 2500 $/t ; 6,5% pour un prix entre 2500 $/t et 3000 $/t, 4% pour un prix entre 3000 $/t et 3500 $/t, 0 si le prix est supérieur à 3500 $/t.

Nous cherchons à confirmer le caractère adapté des coefficients de variation pour gérer la volatilité de la TC. Par ailleurs, il s'agit d'identifier à qui profite cette évolution des coefficients de variation. Nous modélisons le changement des coefficients de variation passant de 15% à 1% par tranches de 5% (voir la table 3.8).

Tableau 3.8: Modification des coefficients de variation de la TC

Coefficients de variation de la TC	15%	10%	5%	1%
Evolution		*33%*	*50%*	*80%*
TC	198	200	201	203
Prix du métal	2521	2500	2478	2462
Prix résiduel	796	812	828	841
Offre/demande de concentré	2982	3000	3017	3031
Offre/demande de métal	2535	2550	2564	2576
Profit unitaire du transformateur	1,09	1,04	1	0,98
Profit unitaire du mineur	0,80	0,81	0,83	0,84

Source : Auteur

Lorsque la valeur du coefficient de variation passe de 15% à 1%, le revenu unitaire du transformateur baisse de 10% alors que les mineurs gagnent environ 5%. La baisse des coefficients de variation est associée à une hausse du prix résiduel (en augmentant la TC réalisé) et profite aux mineurs. En modélisant cette réduction, on peut aisément comprendre la tendance sous-jacente de cette évolution : baisse du profit des transformateurs et hausse du profit des mineurs.

Notons que les coefficients de variations restent un outil de flexibilité de la TC que les firmes approuvent. L'utilisation des coefficients de variation correspond au lien entre le marché du métal et celui du concentré. Ainsi, les variations de la TC réalisée sont en ligne avec celles du prix du métal. L'application de ces coefficients est également un outil de coordination de la filière permettant de transférer les hausses et les baisses du prix du métal à l'ensemble des acteurs de la filière. Il s'agit du partage du profit en cas de hausse du prix du métal et du fractionnement des pertes en cas de baisse.

En raison d'une forte volatilité du prix du zinc, nous estimons que le niveau des coefficients de variation va poursuivre sa baisse. Leur utilisation va devenir plus complexe avec l'application des coefficients-paliers en fonction du prix du métal. Ceci permettrait de contenir la volatilité de la TC sans pour autant éliminer son indexation sur le prix du métal.

La recherche de plus de flexibilité dans la fixation de la TC est associée à la fréquence de négociation de la TC. La fréquence des négociations annuelles est régulièrement remise en cause par les mineurs qui citent le marché du minerai de fer où les prix sont fixés chaque trimestre. Les industriels sont partagés sur cette proposition : 46% des firmes interrogées souhaitent que la TC soit négociée plus souvent contre 54% qui sont satisfaits de la fréquence des négociations. Sur le marché du minerai de fer et du charbon à coke, cette évolution avait été imposé par un groupe d'acteurs dominant le marché. En effet, ce marché utilisait le benchmark annuel afin de conclure des contrats de long terme entre mineurs et transformateurs entre les années 1960 et 2010.

Le système de valorisation du charbon à coke a été modifié en 2010 pour passer en système de fixations trimestrielles sous l'impulsion des accords entre BHP Billiton-Mitsubishi Alliance et les transformateurs japonais. L'argument derrière ce changement était de rendre les prix du marché plus transparents, car ils ne doivent pas être décidés « quelque part dans une arrière salle remplie de fumée » selon Marius Kloppers, PDG de BHP (Zhang, 30 juillet 2010). Ce précédent démontre comment l'intervention d'une firme doté d'un pouvoir du marché important peut créer un précédent de valorisation accepté par d'autres firmes sur le marché. L'augmentation de la fréquence des négociations de la TC est donc probable si la concentration des firmes s'intensifie.

Les trois scénarios des évolutions futures démontrent l'asymétrie de l'impact de ces évolutions sur le profit des firmes. Les firmes souhaitant l'évolution y voient une amélioration de leur profit. Naturellement, cette modification de la répartition du profit impacte négativement les autres firmes ; elles sont donc opposées à ce changement. En absence de domination d'un groupe de firmes, ces changements ne peuvent pas être mis en place. Nous concluons donc que la TC ne va pas évoluer sous la pression des forces internes à la filière. Même l'augmentation de la volatilité de la TC ne semble pas suffire pour enclencher ce changement.

Ces demandes d'évolution témoignent d'un clivage naissant au sein de la filière entre les firmes satisfaites du fonctionnement existant et celles souhaitant obtenir un profit plus élevé en imposant un rapport de force. La matrice 3.9 récapitule les changements des profits de chaque groupe de firmes en fonction des changements souhaités. Un gain est associé à l'amélioration du profit, alors qu'une perte caractérise sa détérioration. Tout changement implique l'existence des gagnants et des perdants car les changements demandés concernent la redistribution du profit et non pas l'augmentation du profit global. L'utilisation de la TC fixe ou de la TC variable est

un scénario qui divise les firmes traditionnelles en deux camps en fonction de leur activité.

Le rapport de force entre les mineurs et les transformateurs du groupe dit des "traditionnels" sera déterminant pour la mise en place de la TC variable, car en dehors des divisions au sein de ce groupe les autres groupes ne vont pas s'y opposer. Une domination des transformateurs dans ce groupe est décisive pour la mise en place d'une TC variable. En l'absence de cette domination, une réalisation simultanée des deux scénarios est possible, elle correspond à une solution coopérative visant à satisfaire le plus grand nombre des firmes de la filière. Il s'agit de l'association de la TC variable avec la réduction de la part du métal payable où les pertes du scénario 1 seront compensées par le gain du scénario 2.

Tableau 3.9: Matrice des pertes et des gains associés aux évolutions futures

Groupes	Scénario 1		Scénario 2	Scénario 3
Scénarios	TC fixe	TC variable	Réduction de la part payable du métal	Réduction des coefficients de variation de la TC
Groupe 1 (Traditionnels)	Gain mineurs et perte transformateurs	Gain transformateurs et perte mineurs	Gain mineurs et perte transformateurs	Gain
Groupe 2 (Diversifiés)	Perte	Gain	Perte	Perte
Groupe 3 (Hétérodoxes)	Impact nul	Perte	Impact nul	Impact nul

Source : Auteur

La méthode de valorisation du concentré utilisée actuellement a très peu de chances d'être modifiée en l'absence de firmes disposant d'un important pouvoir du marché. Les transformateurs traditionnels peuvent compter, sur cette question, sur le soutien des firmes diversifiées, qui souhaitent une TC plus flexible encore et disposent d'outils pour tirer profit de cette flexibilité. Il y a donc trois positions concernant la TC sur une échelle de flexibilité, des mineurs qui veulent une TC fixe aux acteurs diversifiés qui souhaitent une TC fonctionnant comme un prix de marché. Parmi les évolution de la TC proposées par les acteurs traditionnels figure la création d'une liste de TC différentes pour tenir compte de la valeur différente associée à certains types de concentré.

Les données historiques montrent pourtant que le partage du profit de la production du métal se fait d'une manière inégalitaire. Les mineurs obtiennent une part de profit supérieure à celle des transformateurs (Section III) et la tendance est à la dégradation de la position des transformateurs. La situation est cependant fluctuante, les transformateurs prenant les devants pour ajuster leur production et ainsi gagner en pouvoir de négociation, ce qui entraîne une

augmentation de la TC[40]. Néanmoins, cette récente faiblesse des mineurs n'est pas structurelle, mais conjoncturelle, en absence de domination nette des transformateurs. Ceci illustre que la question du partage du profit déterminera le futur de la TC comme instrument de coordination.

Le degré de concentration dans l'industrie n'est pas encore suffisant pour que quelques firmes puissent imposer aux autres les changements souhaités. Néanmoins, le processus de concentration s'accélère avec *Glencore* comme acteur principal de la recomposition du paysage : le marché devrait donc connaitre une rupture à moyen terme. Selon nous, la modification de la part du métal payable et l'augmentation de la fréquence des négociations sont les deux évolutions susceptibles d'avoir lieu à moyen terme, traduisant le poids croissant des firmes "diversifiées".

Ceci conclut notre présentation des dynamiques endogènes à la filière et de leur conséquences sur la TC. Nous avons démontré le rôle central de la TC à la fois comme indicateur et instrument des équilibres de la filière. Cet instrument est aujourd'hui contesté dans un contexte de modification de la répartition des pouvoirs de marché au sein de la filière. Il ne semble pas envisageable que les seules forces internes à la filière fassent évoluer la TC de façon significative. Nous pouvons cependant dégager quelques pistes qui pourraient réduire les tensions entre les acteurs "traditionnels" et "diversifiés" et favoriser l'optimum de filière. Il s'agit de la mise en place simultanée des évolutions souhaitées, dans le but de l'optimisation du fonctionnement de la filière, de sorte à compenser les pertes par les gains.

Malgré sa forte cohésion et l'interdépendance de ses acteurs, la filière est loin d'évoluer en vase clos. C'est pourquoi dans cette dernière section nous présentons les forces exogènes qui auront un rôle jouer dans l'évolution de la TC et de la coordination au sein de la filière.

II.3 Les évolutions de l'environnement productif et financier

Les évolutions exogènes à la filière peuvent être séparées en deux catégories : les changements de l'environnement productif et l'apparition de nouveaux acteurs. La première catégorie regroupe l'ensemble des facteurs ayant un impact sur les contraintes de production du mineur et du transformateur et nécessitant une adaptation de ces firmes à ces nouveaux défis. La complexification du métier qui en résulte requiert des compétences spécifiques pour la gestion de nouveaux risques. Les firmes de la filière manquent systématiquement de ces compétences. Il apparaît alors nécessaire de faire appel à des intermédiaires plus à même de gérer ces contraintes,

[40]Smelters "will still be looking to try to redress some of that revenue share that has gone toward miners over the past 20 years," Colin Hamilton, Macquarie Platts (fevrier 2014).

ce qui constitue notre deuxième catégorie. Ainsi, les changements de l'environnement productif et financiers sont à l'origine de la complexification du métier et de l'apparition de nouveaux acteurs intermédiaires.

II.3.1 La modification de l'environnement productif

Par évolution de l'environnement productif nous entendons les modifications règlementaires, contractuelles qui nécessitent une adaptation du processus de production. Ces évolutions, subies par les firmes, tendent à alourdir les contraintes de production déjà existantes. Les dynamiques exogènes incluent le déséquilibre durable entre l'offre et la demande du concentré, le développement des contrats spot associés à l'existence des contrats de *tolling*, ainsi que l'évolution de la règlementation environnementale et fiscale. Nous discutons des répercussions de ces évolutions récentes de l'environnement productif sur les cinq contraintes de la filière évoquées dans le début de notre travail [41].

Le mouvement de la fermeture des mines, anticipé par la filière, s'accélère à partir de l'année 2015 créant un déficit structurel du concentré. Cette situation accentue la contrainte de l'hétérogénéité du concentré réduisant sensiblement l'offre du concentré (en quantité et en variété). Selon M. Maté, responsable du négoce de zinc chez Glencore Xstrata « plus de 2 000 tonnes supplémentaires de zinc offert seront nécessaires d'ici 2016. Il y a une vrai pénurie de projets de qualité en préparation ou prêt à être fonctionnels ».

De nombreux acteurs de la filière cherchent à profiter de ce déficit pour améliorer leurs marges (espérant une hausse du prix du métal) ou bien pour lancer les projets miniers jusqu'alors peu rentables. Or, selon Home (12 juin 2015) ce n'est pas le remplacement des mines existantes qui renseigne sur l'équilibre de la filière, mais le niveau de la TC qui augmente depuis 2011, témoignant des réserves de concentré suffisantes pour couvrir temporairement la baisse de production minière.

Néanmoins, malgré l'utilisation de la TC en tant qu'indicateur avancé des déséquilibres futurs, son rôle anticipatif tend à diminuer en raison du comportement imprévisible des firmes chinoises. Alors que la Chine est le plus grand producteur de zinc dans le monde (environ un tiers de la production mondiale (USGS, 2014)) le comportement des firmes chinoises est décrit par Garry Berry, analyste chez Barclays, comme « the big wild cat ». Peu de prévisions sont disponibles quant à la prise de décisions par les firmes chinoises. L'absence de ces prévisions est un important facteur d'incertitude nuisant à la gestion des potentielles pénuries, notamment

[41] Pour rappel, ces contraintes sont : l'hétérogénéité des concentrés, la sécurité des approvisionnements, le coûts de main-d'œuvre, le coûts d'énergie et le coûts de transport.

du fait de la contrainte d'hétérogénéité des concentrés.

L'industrie de zinc est également en première ligne sur la question environnementale, du fait notamment d'un certain nombre de produits annexes (plomb, cadmium et acide sulfurique). Les coûts de protection contre les dommages environnementaux pèsent de plus en plus dans les décisions de localisation des firmes et se rajoutent aux contraintes des coûts (coût de main d'oeuvre et coût d'énergie). L'oxyde du zinc et la poudre du zinc sont les deux substances visées par la règlementation REACH[42], alors que la pollution de l'eau et de la terre est évaluée par SCHER, Scientific committee on Health and environmental risks (UMICORE, 2015).

Les transformateurs, suivant la logique des "havres de pollution" (Kellenberg, 2009), privilégient pour les nouveaux investissements des pays à règlementation plus "souple"[43]. Zhang *et al.* (2012) effectuent une revue des études sur la pollution de la filière du plomb et du zinc ; ils concluent que le plomb et le cadmium sont deux substances nocives ayant l'impact le plus important sur la santé ; le concentré de zinc contient ces deux métaux. Selon The World Bank (1998) la réduction de la pollution dans la filière du zinc doit passer à une organisation de production plus efficace alliant la réduction des émissions (gaz, eau et solides) la maximisation du recouvrement et l'optimisation du processus de production.

Selon l'UNCTAD (2014) le niveau des taxes[44] sur les ressources naturelles payé par les plus grandes compagnies minières varie en 2012 entre 1% et 14% en fonction de la localisation de la production. Ceci répond à un souci croissant des pays de préserver une rente issue des ressources naturelles tout en limitant la dépendance des exportations (Börger *et al.*, 2009) et (Beylot et Villeneuve, 2015).La concurrence fiscale internationale peut modifier sensiblement la localisation des sites miniers et de transformation dans un futur proche aggravant la contrainte de transport des firmes.

On voit s'opposer deux logiques : la logique protectionniste poussant les pays à augmenter les taxes et la logique d'intégration commerciale caractérisée par une prime au moins-disant pour les taux d'imposition (Voir Candau (2008) sur les liens entre la concurrence fiscale, la ville et le commerce.). On peut s'attendre à ce que les principales sociétés multinationales puissent maintenir plus facilement leur part de marché en raison de leur présence internationale déjà

[42]REACH est le règlement sur l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et les restrictions des substances chimiques entré en vigueur en 2007. REACH fait porter à l'industrie la responsabilité d'évaluer et de gérer les risques posés par les produits chimiques et de fournir des informations de sécurité adéquates à leurs utilisateurs (Comission Européenne, 2013).

[43]Plusieurs études ont été consacrées à l'impact sociétal élevé de la pollution de l'eau et de la terre par les mineurs et les transformateurs, voir (Zhang *et al.*, 2012) pour la revue détaillée.

[44]Ces taxes se divisent traditionnellement entre taxes à l'exportation, taxes sur le chiffre d'affaires des sociétés minières et redevances minières (royalties, mineral taxes). Ces instruments visent au partage de la rente issue des ressources naturelles entre le gouvernement et l'industrie.

établie et du poids qu'elles ont dans les négociations avec les gouvernements des pays concernés. Elles peuvent ainsi procéder à une importante optimisation fiscale.

Les changements que nous venons de citer concernent les contraintes de production des firmes de la filière. La réponse à ces nouvelles contraintes va conditionner la disponibilité des ressources naturelles en général, et des métaux en particulier (Fraser, 1986, Tilton). La fermeture des mines importantes et le manque de nouveaux projets vont nuire à la coordination actuelle de la filière du fait de leur caractère anticipé. La contrainte des flux matière organisant les transactions entre les firmes résultera en avantage pour les mineurs, dotés du pouvoir décisionnel sur l'écoulement de leur production.

Le cadre règlementaire traduit une multiplication des contraintes du transformateur, qui doit intégrer dans sa structure des dépenses liées à la mise en conformité avec la règlementation environnementale. La difficulté d'exploitation des mines dans les pays appliquant des taxes élevés sur les ressources minières aggrave la contrainte d'hétérogénéité du concentré. Le concentré produit n'est pas forcément celui qui va satisfaire le mieux la demande du transformateur en termes de composition métallique.

De plus, certains changements de l'environnement productif sont à l'origine de nouvelles contraintes. Il s'agit de la modification de gouvernance des entreprises (financiarisation), de la complexification logistique et de la perte de contrôle sur l'exploration.

La financiarisation des cours des matières premières est une nouvelle contrainte pour l'organisation de la filière. Une généralisation du problème principal/agent est à craindre, car les acteurs du zinc ont attiré l'attention des investisseurs en tant qu'opportunité de diversification des actifs plutôt qu'en tant que placement dans une industrie mature. Ainsi, les décisions des firmes deviennent moins transparentes (Falkowski, 2011) et suivent une logique de profit de court terme (cours des actions, capitalisation boursière) au détriment d'un effort de pérennisation de l'activité via la logique de filière.

Le transport du concentré est un autre point sensible non seulement en raison de son coût, mais également compte tenu du dysfonctionnement dans la disponibilité des containers, de la qualité des navires (Tamvakis et Thanopoulou, 2000) et de la multiplication des mouvements de grève dans les ports indiens et chinois. L'augmentation sensible des flux commerciaux vers la Chine était, par ailleurs, à l'origine des tensions liées aux capacités des navires et des containers alloués. On estime que 6 millions de containers manquaient en 2009 pour satisfaire la demande de transport (Tarnef, 2009). Ces tensions des capacités se traduisent par le rallongement du temps de transport et par la recherche des routes alternatives. Bien évidemment, l'importance du timing des livraisons pour les firmes de la filière du zinc nécessite une mise en place des

outils spéciaux pour la gestion de cette nouvelle contrainte de transport.

Les firmes minières ont progressivement perdu le contrôle des opérations d'exploration, ce qui met en danger leur pérennité. L'accès aux nouvelles mines se fait par rachat des concessions auprès des sociétés d'exploration dont l'activité consiste à évaluer le potentiel du projet. Les mineurs doivent anticiper les rachats et se trouvent en compétition directe avec d'autres mineurs de la filière pour obtenir l'accès aux nouvelles mines.

Tous ces éléments témoignent de la complexification des métiers du mineur et du transformateur sous l'impact de nouvelles contraintes de production. De plus, ils doivent faire face à l'incertitude de leur profits liée à une volatilité croissante de la TC. Ainsi, la survie des firmes de la filière dépend non seulement de la gestion de nouvelles contraintes, mais également de la maîtrise du risque de la TC.

II.3.2 Vers une nécessaire gestion du risque de la TC

Les participants de marché opèrent dans un cadre contraint dont les effets conditionnent les choix des firmes en termes de production et de gestion des flux. Les principales caractéristiques de cette problématique relèvent de la gestion des risques financiers et physiques compte tenu de la structure même du marché du concentré métallique. Les firmes opèrent dans un environnement non-homogène où l'industrie minière est plus concentrée que l'industrie de transformation, le marché spot prend une place de plus en plus importante, la volatilité du prix du métal est accentuée par le volatilité de la TC, les coûts de production par rapport au prix du métal sur le marché sont assez élevés. Le risque de la TC mis en évidence doit être mieux géré par les firmes de la filière. Nous décrivons les stratégies de couverture à disposition des firmes de la filière pour la gestion du risque de la TC.

Chaque firme dispose d'une stratégie individuelle pour faire face aux changements de l'environnement productif. Parmi les solutions mises en place, on trouve l'integration verticale, la création des joint ventures avec des companies minières, les partenariats avec les sociétés de transformation, l'amélioration du processus de production, l'innovation et le recyclage (Ayres, 1997, 1999).

Une étude récente de McKinsey Global Institute (2011) souligne les relations entre les stratégies des firmes, le coût de ces stratégies et l'impact sur le profit. Nous nous inspirons de cette grille de lecture pour proposer une revue des stratégies des firmes de la filière du zinc (Table 3.10).

Tableau 3.10: Stratégies des firmes de la filière pour réduire les nouveaux risques

Stratégies des firmes (réponse aux défits actuels)	**Coût**	**Impact du prix du zinc élevé**	**Impact du prix du zinc bas**	**Délai de mise en place**	**Impact par type de risque**
Développer ses propres capacités	Elevé	Positif	Négatif	Long	Risque opérationnel et risque financier
Contrats à long terme	0	Positif, mais retardé	Négatif, mais retardé	Moyen (durée du contrat	Risque opérationnel (force majeure)
Intégration verticale	Moyen	Gain modéré, indépendant du niveau du prix	Gain modéré, indépendant du niveau du prix	Moyen (temps de la mise en place)	Élimination du risque de la contrepartie, risque d'approvisionnement réduit mais pas éliminé
Contrat spot	0	Positif	Négatif	Immédiat	Risque financier élevé, risque d'approvisionnement élevé
Utilisation des instruments financiers	0	Gain potentiel important associé à un risque élevé (si le prix est volatil)	Gain potentiel important associé au risque élevé (si le prix est volatil)	Court ou moyen (temps de se doter du personnel qualifié)	Élimination du risque de la contrepartie et du risque financier (warrants)

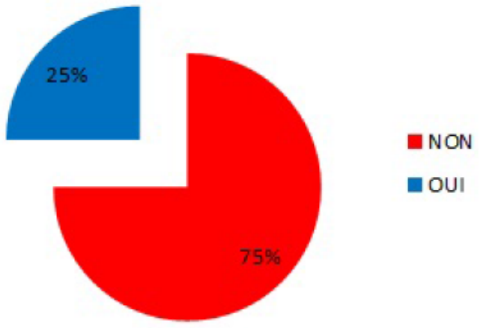
Source : Auteur

La majorité de ces stratégies comporte un risque, notamment en ce qui concerne les investissements importants dans la capacité de production ou bien une concentration du marché trop importante. Alors que les risques opérationnels liés au fonctionnement de la firme ne peuvent pas être couvertes, le risque financier peut l'être. L'utilisation d'instruments financiers dans un objectif de hedging est une des rares stratégies où les outils disponibles permettent une bonne maitrise du risque. On peut considérer qu'en raison des faibles délais requis pour la mise en place de cette stratégie, elle devrait correspondre à une solution privilégiée par les firmes.

Néanmoins, nous estimons que cette stratégie est intéressante plutôt pour les firmes de grande taille, capables d'exercer un contrôle sur les opérations effectuées par les employés sur les marchés financiers. Les firmes de taille moyenne ont plutôt intérêt à sous-traiter les opérations de couverture aux établissements spécialisés. La gestion du risque de prix et la gestion du risque du taux de change sont bien identifiés et gérés par les firmes, alors que la gestion du risque de la TC à l'aide du hedging est souvent ignorée ou peu détaillée.

"Le hedging, contrairement à ce qui est dit traditionnellement, n'a pas nécessairement pour but la recherche d'une protection contre le risque de prix" (Marquet, 1992). On distingue l'*offset hedging* servant de protection contre le risque de variation de marge aux négociants et aux transformateurs, alors que le *fix price hedging* utilisé par les producteurs et les utilisateurs finaux pour valoriser leur production éliminant ainsi la différence de prix liées au timing des opérations. Les mineurs et les transformateurs ont recours au *fix price hedging* dont nous discutons dans la suite de cette partie.

Graphique 3.16: Utilisation du hedging de la TC



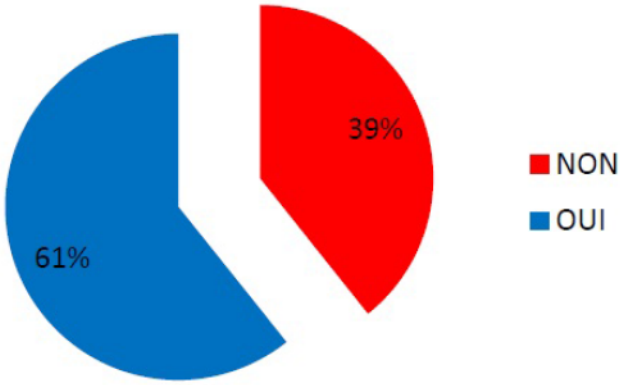
Source : Auteur

Notre étude des firmes via le questionnaire a démontré que peu de firmes utilisent les outils de hedging de la TC (voir le graphique 3.16). 75% des firmes interrogées n'ont pas recours au hedging de la TC. Nous estimons que compte tenu de la volatilité croissante de la TC de plus en plus de firmes vont devoir procéder au hedging de la TC. L'exemple de la prise en compte de la TC dans la stratégie de hedging est détaillé dans l'encadré 3.2 sur l'exemple de l'achat par un transformateur du concentré contenant 300 tonnes de zinc.

Les personnes interrogées ont eu la possibilité de laisser leurs commentaires quant à d'autres options que le hedging pour gérer le risque de la TC. La TC fixe négociée chaque trimestre a été citée en tant qu'alternative au hedging de la TC. Cette solution est acceptable uniquement si le transformateur arrive à obtenir un revenu suffisant à l'aide de la TC. Cependant, la portée de cette solution est assez limitée compte tenu du besoin de renégocier la TC trop fréquemment. Une autre solution proposée consiste à rattacher le niveau de la TC au prix LME du zinc, et par conséquent, ne garder que la TC en tant que proportion du prix LME en vigueur. L'avantage de cette option réside dans la facilité du hedging, mais elle présente également l'inconvénient des négociations trop fréquentes pour réaliser les ajustements suite au partage du profit entre les firmes.

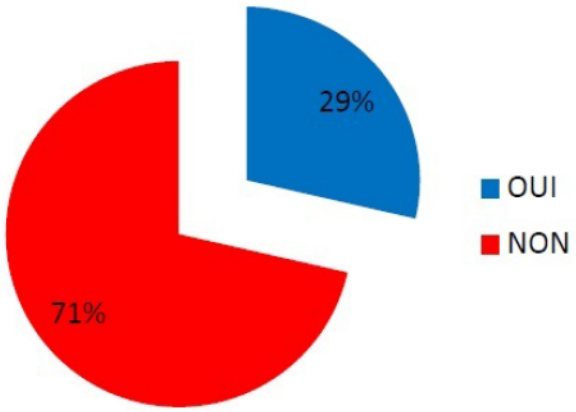
Les coefficients de variation sont alors considérés en tant qu'outils de hedging et en tant qu'outils d'obtention du profit à court terme. Les réponses des firmes au questionnaire fournisseur un indicateur quant au double emploi des coefficients de variation. 61% des firmes interrogées indiquent que les coefficients de variation correspondent à un outil de hedging. Cependant seulement 29% des firmes interrogées utilisent les coefficients de variation pour obtenir le profit à court terme (graphiques 3.17 et 3.18).

Graphique 3.17: Utilisation des coefficients de variation de la TC en tant qu'outil de hedging



Source : Auteur

Graphique 3.18: Obtention du profit à court terme en utilisant les coefficients de variation de la TC



Source : Auteur

Encadré 3.2: Fixation du prix

Prenons l'exemple du concentré avec le prix fixé sur la base 2MAMA (le prix est fixé sur la moyenne de *cash settlement* de LME du 2nd mois après le mois de l'arrivée). La TC associée à ce contrat est également basée sur le prix du métal et son montant représente une somme importante pour la firme (pouvant dépasser la marge sur le contrat en question). Ainsi, le transformateur qui achète le concentré doit d'abord hedger le risque de prix et de la TC du concentré et ensuite le risque de prix du métal produit.
Le hedge doit couvrir uniquement le contenu métallique du concentré et non pas le poids total du concentré. Imaginons que le concentré est livré en mai, ainsi la fixation du prix se fera en juillet (2MAMA). Il faut donc hedger quotidiennement une proportion du métal (300 tonnes à hedger sur 22 jours ouvrables correspondent à 14 tonnes à hedger par jour).
La TC appliquée est calculée en fonction du prix du métal et il est impératif de déterminer la proportion que représente la TC dans le prix du métal afin de mettre en place une stratégie de hedging. Supposons que la TC correspond à 30% du prix du métal au moment de la vente. La quantité du métal couverte sur la moyenne du mois de juillet serait augmentée de cette valeur.
Le hedging de la TC a lieu au moment de l'achat ensemble avec le hedging du contenu métallique. C'est un hedge "long" pour la totalité du métal contenu et 30% supplémentaires correspondant à la TC, la durée du hedge couvre la période de possession de la matière par le transformateur. Lorsque le transformateur aura transformé le concentré en métal il doit couvrir le risque de prix associé à ce métal. Il positionne un hedge "short".
Le hedging de la TC permet de compenser dans le ses inverse les fluctuations du prix du métal. Si le prix du métal baisse, alors cette baisse est partiellement compensée par la hausse de la TC. Inversement, une hausse de prix est compensée par la baisse de la TC. Ainsi, le transformateur peut bloquer sa marge et éliminer l'incertitude.

Plusieurs stratégies existent pour obtenir un profit supplémentaire du à la différence des conditions d'achat et de vente du concentré avec l'application de la formule actuelle ou bien en utilisant une vente selon un contrat spot. Ces stratégies sont utilisées principalement par les négociants, car les industriels n'ont pas vocation à prendre le risque lié aux fluctuations des prix.

La première stratégie consiste à acheter sur la base de la TC annuelle et des coefficients de variations connus pour vendre ensuite le concentré sur le marché spot avec une TC fixe. La part variable du prix du métal peut être couverte (si elle en en faveur du négociant) ou bien le négociant peut attendre le prix spot favorable compléter sa marge sans avoir recours au hedging des coefficients de variation. Une autre stratégie est de hedger les coefficients de variation à la vente avant de procéder à l'achat de la matière physique et au hedging de la TC et du prix du métal en suivant. Enfin, il est possible de procéder aux transactions sur le concentré avec un contenu métallique très faible. Cette solution permet d'avoir peu de métal à hedger tout en appliquant la TC et les coefficients de variation à chaque tonne du concentré. Ainsi, on tire un profit plus important de la fluctuation des coefficients de variation en négociant un concentré avec le contenu métallique faible.

Nous avons identifié que l'utilisation du hedging de la TC n'est pas systématique par les mineurs et les transformateurs. Les négociants sont les firmes qui sont les plus à même de bâtir des stratégies de hedging complexe compte tenu de leur rôle d'intermédiaire et de leur souhait d'obtenir un profit complémentaire. Ces derniers temps on assiste également à un phénomène nouveau où les firmes de grande taille mettent en place des stratégies de hedging leur permettant non seulement d'éliminer le risque de prix, mais également de leur fournir un complément de profit (Eskdale, 2013). Ainsi début 2012, Glencore a conclu un contrat d'achat du concentré du zinc qui ne contenait pas de TC (ce qui augmentait le prix résiduel récupéré par le mineur Volcan qui a procédé à cette vente)[45].

Cette pratique est tout à fait inhabituelle. A l'époque les analystes ont expliqué cet achat par une plus grande part du 'free metal' obtenu par Glencore anticipant une hausse de prix du métal. Or, la hausse du métal qui a été anticipée n'a pas eu lieu et on tend à supposer que la stratégie de Glencore a été bien plus subtile. Il s'agit de renoncer à une charge fixe pour transformer le concentré en échange d'une possibilité de bénéficier de la hausse du prix du métal, ce qui correspond à une option d'achat (instrument financier) que le transformateur obtient gratuitement, car il ne procède pas à l'achat de cette option, mais la construit lui-même.

L'existence de la TC correspond à un arrangement entre le mineur et le transformateur basé sur le prix du métal et permettant de partager le profit et de rémunérer la contrepartie lorsqu'on en a la possibilité (le mineur paie une TC plus élevée lorsque le prix du métal est élevé et son profit est conséquent, le transformateur obtient une TC plus basse lorsque le prix du métal est bas afin de « supporter » l'activité du mineur). Il s'agit d'une situation où les deux contreparties se trouvent gagnantes, c'est pour cette raison que le système fonctionne toujours sans forcément évoluer vers d'autres types de valorisation.A la différence, le hedging représente une solution individuelle où il n'y a pas de partage de coût ou de profit entre les contreparties car la valeur de l'option va fluctuer en fonction de plusieurs facteurs. Ainsi, l'option achetée par le mineur n'aura pas le même coût que celle achetée par le transformateur pour la même quantité du métal à hedger.

La volatilité de la TC alimente la réflexion sur la nécessité de la mise en place de solutions de hedging de la TC. En effet, peu de firmes minières et transformatrices utilisent la TC, alors que les variations de la TC assez contenues sont susceptibles de modifier sensiblement leurs profits. Une entreprise n'utilisant pas les stratégies de hedging peut être rapidement pénalisée dans ses résultats financiers et dans ses négociations avec les partenaires. A l'inverse, une société ayant recours au hedging et à la surveillance étroite des outils financiers sera exposée à des fluctuations de ses résultats du moindre ampleur, et par conséquent, à une moindre volatilité.

[45]Glencore strikes bullish zinc deal. *Financial Times*, 28 février 2012.

Ce changement de culture exogène pourrait faire évoluer l'organisation actuelle de la filière plus rapidement que les facteurs endogènes générant des tensions liées à la TC. Nous constatons cependant que les sources sont les mêmes : les acteurs diversifiés qui veulent changer la logique du marché sont aussi des acteurs portés par une nouvelle génération d'investisseurs, plus prompts à profiter des arbitrages réglementaires, favorisant les profits à court terme et renforçant constamment leur position pour arriver à leurs fins[46].

III Prospective pour la filière du zinc

L'évolution récente du tissu industriel, les défis posés par le changement durable et prononcé de la structure des ressources disponibles, l'augmentation des incertitudes géopolitiques, l'attention particulière portée aux actifs financiers des firmes forment une série de changements exogènes à l'origine de réflexions sur une nécessaire évolution de la valorisation du concentré métallique et sur la place de la TC dans cette valorisation.

Dans cette section nous proposons une synthèse des résultats de notre travail dans une optique prospective pour la filière. Les hypothèses que nous faisons sur le développement futur de la filière du zinc sont basés sur l'ensemble de nos résultats et nous les illustrons avec des exemples tirés de l'actualité récente.

Nous proposons notamment de chiffrer les niveaux critiques de la TC qui indiquent une modification durable de l'équilibre de la filière. La TC peut évoluer vers une variable de prix (option la plus probable selon nous) ou bien tendre vers un arrangement contractuel de nature différente (intégration verticale plus poussée et fin de tout "marché du concentré", mise en place des accords de tolling, etc.). La modification de la structure de filière ne permettra pourtant pas d'éliminer les contraintes de production : les firmes vont devoir trouver des solutions de gestion de ces contraintes au sein de cette structure de filière à venir.

Nous avons souligné dans ce chapitre et dans le reste de notre travail que toute organisation de la filière de zinc peut être définie par un couple stabilité/efficacité. Nous avons exploré ces deux cas polaires à l'aide de deux hypothèses sur la nature de la TC. Dans le chapitre 1 nous considérons la TC en tant qu'instrument de coordination (variable *benchmark*), ce qui nous permet d'identifier son rôle dans la coordination des échanges. Cette hypothèse est basée sur une vision de la filière comme un oligopole bilatéral avec un niveau important de coopération. Nous concluons que dans ces circonstances la TC confère une stabilité importante à la filière

[46] La société *Glencore* a ainsi racheté le spécialiste de logistique et de stockage *Pacorini* pour se développer au-delà du négoce et de la mine, où elle avait renforcé sa position en fusionant avec *Xtrata*.

sans pour autant permettre un fonctionnement efficace et optimal.

Dans le chapitre 2 à l'inverse, la TC est modélisée comme un prix de marché. Nous concluons alors qu'elle permet au mineur et au transformateur d'atteindre des niveaux de production optimaux en maintenant une pression concurrentielle suffisante. Cette analyse pose comme hypothèse la concurrence pure et parfaite : l'efficacité du fonctionnement de la filière est alors imposé par le cadre de la modélisation. L'équilibre ainsi obtenu est caractérisé d'instable et dérivant vers la concentration (sortie du marché) ou la concurrence monopolistique (stratégie de niche).

Ainsi, l'architecture de la filière, affichant des degrés différents de stabilité et d'efficacité, dépend de la nature de la TC. Il est impossible d'après nos résultats d'obtenir une stabilité parfaite et une efficacité totale, un arbitrage est nécessaire. L'impossibilité d'atteindre une solution efficace et stable dans le cadre de l'hypothèse 2 nous amène à explorer les raisons de l'instabilité de l'équilibre dans le chapitre 3.

L'instabilité peut venir de l'intérieur et de l'extérieur de la filière. En interne, nous étudions comment les positions des firmes ont évolué du fait des chocs sur les déterminants de la TC par le passé. Nous identifions l'existence de groupes au sein de la filière sur la base de leurs avis sur la TC et sur son évolution. Ces groupes diffèrent du clivage traditionnel basé sur l'activité des firmes (mineurs versus transformateurs). Nous démontrons qu'il existe un groupe de firmes souhaitant une refonte en profondeur de la TC et un autre groupe souhaitant des évolutions mineures de la TC en respectant le cadre de négociations actuel. Sur la base des réponses des firmes nous concluons à l'absence de facteurs internes pouvant déclencher les évolutions de la filière. Cette stabilité interne nous permet de conclure que ce sont les contraintes extérieures qui amèneront les changements pour le système de la TC.

Nous en concluons dans ce chapitre que la TC est une variable centrale pour l'organisation de la filière, à la fois instrument et indicateur avancé de la stabilité de la structure de marché. La TC utilisée en tant qu'instrument de coordination témoigne de la stabilité de la filière. L'instabilité de la filière est prévisible lorsque le fonctionnement de la TC se rapproche d'une variable de prix dans un cadre concurrentiel.

Le futur de la TC est donc étroitement lié à l'évolution de la structure de la filière. Nous présentons d'abord un pronostic sur les évolutions possibles de la TC, qui dépend des stratégies des firmes de la filière. La coopération entre les firmes permettrait de faire évoluer la TC tout en maintenant les avantages de l'organisation existante. Les stratégies individuelles et/ou dominantes amèneront à l'inverse la disparition de la TC assortie d'une perte de contrôle des opérations de la filière que nous détaillons en fin de cette section.

III.1 Stratégies d'avenir : coopération ou passager clandestin ?

Nous avons conclu que l'évolution de la TC passera par l'action des facteurs exogènes de la filière en raison d'une grande inertie à l'intérieur de la filière. Selon nous, le cycle des matières premières, en particulier celui du zinc, correspond à un choc de ce type. Le prix du zinc a enregistré une volatilité croissante depuis des années. Après le pic à la fin des années 80, le prix du zinc a été relativement stable jusqu'aux années 2000.

Entre 2006 et 2011, le prix du zinc devient plus volatil affichant sa valeur maximale en 2006 ainsi qu'une hausse importante en 2011. Cette période "faste" des prix élevés s'est traduite par un vrai engouement des mineurs qui ont procédé à des ouvertures de nouvelles mines et à des investissements dans de nouvelles capacités. Ce choix a été motivé par le fait que les prix de tous les métaux non ferreux ont suivit cette hausse, en particulier le cuivre et le nickel qui sont considérés comme des "drivers" des prix des métaux.

Cette croissance des capacités minières a fini par influer sur les négociations entre les mineurs et les transformateurs. Les mineurs ont cherché à placer leur concentré, alors que les capacités de transformation restaient insuffisantes. Le prix élevé du zinc a permis aux mineurs d'accorder une TC généreuse aux transformateurs, qui ont fini pas absorber le surplus du concentré. Ainsi, l'augmentation des quantités produites s'est faite non seulement en réponse à la hausse de la demande finale, mais principalement pour profiter de l'aubaine des prix élevés du métal. Ceci s'est traduit par l'accumulation d'un stock de concentré à partir de 2008 puis par la hausse du stock du métal en 2008-2009.

Cet exemple illustre bien la manière dont la filière du zinc a été déséquilibrée par des facteurs externes. La volatilité croissante des prix de matières premières due en partie au comportement des investisseurs en recherche de profit à court/moyen terme, a mis en danger l'organisation de la filière. Le choc externe pour la filière correspond à la baisse du prix du métal qui a suivi les hausses des années 2000. L'équilibre au sein de la filière a été restauré grâce à l'action de la TC, qui a amorti le choc de la baisse de prix. L'équilibre de la filière tient donc à l'usage de la TC en tant qu'instrument de gestion quantitative dans une perspective de coopération. Néanmoins, le passage en force des mineurs pour augmenter les quantités sans tenir compte des fondamentaux du marché a été un facteur de mécontentement des firmes transformatrices qui ont du partager les conséquences de la baisse des prix du métal avec les mineurs.

Cette description du rôle de la TC va dans le sens de nos observations sur le statut de la TC comme gage du bon fonctionnement de la filière. Tant que la TC est maintenue, les firmes évoluent dans une optique de coopération malgré les chocs. L'utilisation de la TC par les firmes

et le maintien de la TC telle qu'elle a été mise en place il y a un certain temps est également un tribut à la bonne performance de la TC dans ce rôle et une marque des bénéfices partagés.

La TC est une variable de transmission des impacts entre la filière et l'environnement productif de la filière. Sous l'impact des changement externes la TC détermine la nature de l'équilibre technique, économique et organisationnel qui va se mettre en place. Elle sert de canal de transmission des évolutions et ainsi transpose des informations sur les ajustements d'un équilibre à un autre. Il s'agit d'un cercle vertueux où la TC agit en tant qu'instrument d'amortissement des chocs.

Ce fonctionnement "vertueux" est possible uniquement si les firmes sont d'accord pour coopérer et coordonner leurs activités. Si une partie des firmes décide de poursuivre une stratégie individuelle au détriment de la stratégie de coordination, le cercle vertueux des trois équilibres devient un cercle vicieux. Si un choc externe a été amorti par la TC alors qu'une partie des firmes voulaient en profiter, elles chercheront à obtenir un gain autrement, en créant des déséquilibres quantitatifs et en négociant une TC plus intéressante. Ce comportement aboutit donc à une modification du pouvoir de marché au sein de la filière.

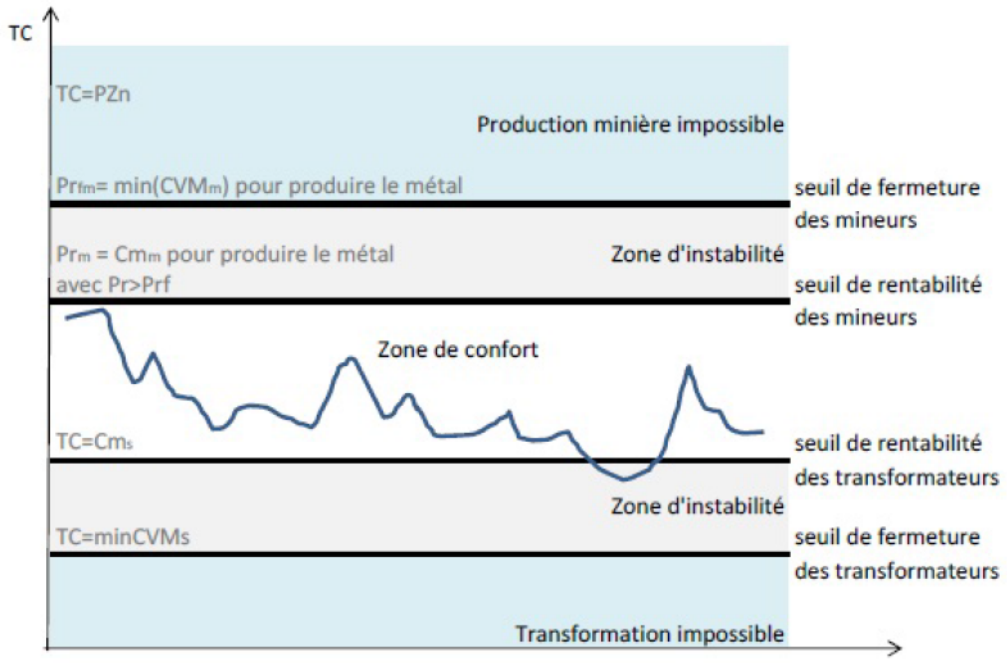
Nous illustrons ce changement de comportement par l'exemple des ajustements individuels au détriment de la solidarité de la filière. Historiquement le marché du concentré est *consumption-driven*. Un choc externe de demande implique un accroissement de la production minière. Les négociations de la TC permettent la mise en place d'une TC plus élevée pour que les transformateurs ajustement leurs capacités de transformations. Ainsi, en 1993 le surplus sur le marché du concentré a été absorbé par les mineurs qui ont réduit les capacités, ainsi les transformateurs n'ont pas du prendre l'initiative de l'ajustement.

En 2013 en revanche les transformateurs ont du prendre les devants pour ajuster leur production en situation du déficit, courant le risque de ne pas être suivi par les mineurs. Cet exemple illustre un phénomène récent ; celui des stratégies d'ajustement en vue de gain du pouvoir de négociation, ce qui témoigne de la dissolution progressive de la solidarité de la filière.

Le succès de ces stratégies correspond au comportement du passager clandestin sur le court terme car il permet d'obtenir une TC plus favorable. Pour l'instant l'organisation de la filière ne prévoit pas de sanctions pour ces comportements non coopératifs, ce qui renforce la tentation de le reproduire ou bien de développer d'autres stratégies court-termistes (ventes spot en Chine).

La TC est donc un indicateur de la solidarité de la filière, car l'usage de la TC tient à la coopération entre les firmes. Inversement, la solidarité de la filière dépend de la TC de par une répartition des profits équitable entre les firmes. Si la TC est amenée à évoluer, cela prouverait

Graphique 3.19: Niveaux de la TC traduisant une stabilité de la filière



Source : Auteur

que la solidarité de la filière diminue. Le constat d'une évolution de la TC est donc un signal que l'organisation de la filière est menacée.

Comment évaluer l'avancement de ce processus ? Il ne s'agit pas seulement de surveiller le maintien en vigueur de la TC, mais également observer les niveaux que la TC prend. Nous avons comparé la TC au "serpent dans le tunnel" et c'est cette métaphore qui permet d'identifier les évolutions dangereuses de la TC. Les limites de fluctuation de la TC imposées par le serpent se lisent de la manière suivante : lorsque la TC est trop faible les transformateurs ne sont pas satisfaits et ne veulent pas coopérer, lorsqu'elle est trop élevée ce sont les mineurs qui ne suivent pas (Graphique 3.19).

Dans la logique de solidarité classique, les hausses et les baisses sont mesurées, car les mineurs acceptent des hausses pour aider les transformateurs et vice versa : ce sont bien des hausses et baisses incontrôlées qui témoignent d'une baisse de la solidarité de filière. Tant que les fluctuations de la TC sont à l'intérieur des limites de rentabilité des firmes de la filière, le niveau de la TC atteste d'un équilibre du rapport de force et, par conséquent, d'un équilibre quantitatif possible au sein de la filière. Lorsque le niveau de la TC dépasse les limites de la rentabilité, on peut parler d'une évolution de la filière où le mécanisme de coordination via la TC ne fonctionne plus.

Les fluctuations souhaitées de la TC sont contenues dans une bande "de confort" où les mineurs et les transformateurs réalisent des profits. En raison du mécanisme du partage des profits, la valeur de la TC fluctue. Néanmoins, les deux types de firmes réalisent des profits non nuls, donc cette situation reste satisfaisante même en cas du partage du profit déséquilibré. Lorsque la TC sort de la bande "de confort", ceci correspond à une dégradation de la situation des mineurs ou des transformateurs, on est donc dans la bande "d'instabilité". Les firmes en question ne font plus de profits et produisent à perte ; cette situation ne peut être que temporaire dans l'objectif d'assurer la continuité des opérations en attendant une amélioration rapide du profit. Il s'agit bien d'une situation instable et peu durable, qui ne devient menaçante pour la filière que lorsqu'elle perdure.

La sortie de la TC au-delà des limites "d'instabilité" correspond à l'arrêt de production minière ou de transformation en raison de son caractère non rentable. Ainsi, ce niveau de la TC témoigne de l'échec de la coordination et de la rupture de la chaîne de production de la filière.

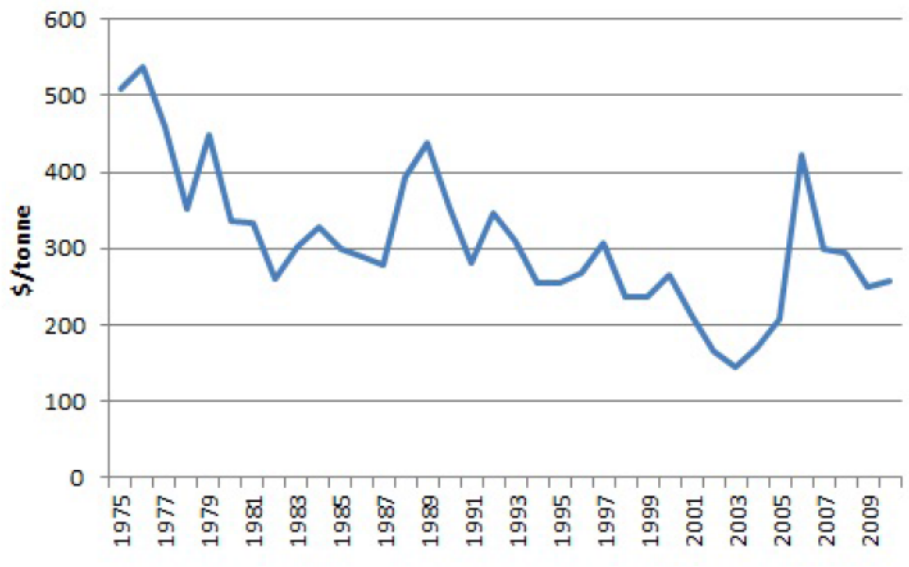
Pour l'instant, les firmes à l'intérieur de la filière souhaitent une évolution de la TC qui correspondrait à un ajustement de son niveau à l'intérieur de la bande "de confort". Un seul groupe de firmes souhaite le rapprochement de la TC d'une variable de prix ce qui correspond au passage de la TC dans la zone d'instabilité. Nous considérons donc que l'inertie qui traduit la solidarité de la filière, est suffisante pour empêcher l'évolution de la TC vers les limites du "tunnel". La coordination de la filière est maintenue malgré les situations où le niveau de la TC pénalise un type de firmes en particulier.

Une TC élevée pénalise les mineurs, mais elle peut également signaler une meilleure allocation des profits entre les firmes de la filière lorsque le prix du métal est élevé. Une TC basse traduit une baisse du profit des transformateurs qui allège en même temps les coûts des mineurs. Elle peut donc traduire le souci de coordination lorsque les mineurs sont en difficulté. Pour identifier ces situations spécifiques nous utilisons les observations de la TC historique en valeur réelle, corrigée de la hausse des prix, avec l'année 2010 comme valeur de base (Graphique 3.20).

Les valeurs historiques de la TC peuvent être analysées dans cette perspective : une recherche d'éventuelles instabilités de la filière lorsque le niveau de la TC devient particulièrement alarmant. Une TC trop élevée traduit un danger pour la profitabilité des mineurs, alors qu'une TC trop basse est un signal pour considérer la baisse de profit des transformateurs.

On observe une baisse tendancielle de la TC réelle. Ce constat fournit un cadre de réflexion sur l'évolution de la TC. Il s'agit d'une dégradation progressive des profits des transformateurs, n'arrivant pas à obtenir une meilleure TC lors des négociations. Les mineurs obtiennent une

Graphique 3.20: TC de base (valeur réelle)



Source : Auteur

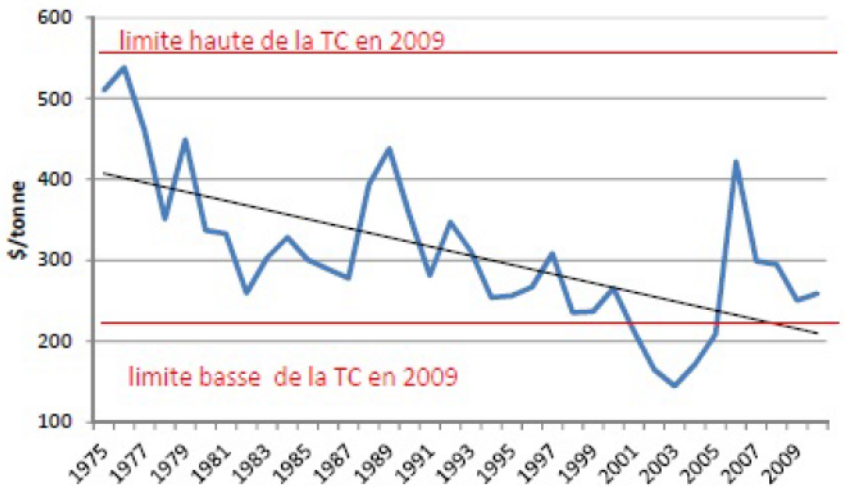
part du profit supérieure à celle des transformateurs. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'ils réalisent les ajustements en premier, ayant un temps d'avance en s'assurant ainsi un pouvoir de négociation. Le bénéfice du revenu du 'free metal' expliquerait également l'accord des transformateurs pour cette baisse de la TC. Selon nous, la combinaisons des deux facteurs (faiblesse du pouvoir de marché des transformateurs associée à la hausse du revenu du 'free metal') est l'explication de cette baisse de la TC.

L'étude des valeurs extrêmes de la TC permet de privilégier la piste de la coordination. Ainsi, la TC basse en 2003 correspond à une situation difficile pour les mineurs (pertes importantes en raison du prix du zinc faible), elle traduit l'effort des transformateurs pour soutenir l'industrie minière. De la même manière, un niveau particulièrement élevé de la TC en 1989 et en 2006 correspond à des pics pour le prix du métal et illustre le partage du profit entre les firmes.

Nous estimons donc que le rapprochement de la TC historique des valeurs limites de fluctuation a été intentionnel dans le cadre de la coopération entre les firmes de la filière : la dégradation des situations individuelles des firmes permet d'améliorer le fonctionnement de la filière dans la globalité. Néanmoins, le profil plus volatil de la TC ces dernières années témoigne de l'affaiblissement de la coordination et du développement des stratégies individuelles visant une plus grande part du profit.

Nous avons estimé la taille du tunnel des fluctuations de la TC sur la base des coûts des mineurs et des transformateur (Graphique 3.21). Nous estimons les seuils pour l'année 2009

Graphique 3.21: Seuils calculés de la TC pour l'année 2009



Source : Auteur

avec comme repère le pris de zinc à 2000 $/t. Comme il s'agit d'une estimation sur les données 2009, le dépassement entre 2001 et 2005 ne doit pas être pris en considération. Seule la valeur de la TC en 2009 peut être interprétée en lien avec ces limites calculées [47]. Lorsque la TC se rapproche de ces limites, la filière sort de l'équilibre stable obtenu par le prix géré, le partage du profit et la coopération. Les raisons de cette sortie de la TC du tunnel seront déterminants pour la nouvelle organisation de la filière (domination d'un groupe de firmes pour capter tout le profit, apparition de nouvelles firmes pour tendre vers la concurrence).

Les modifications du contexte productif actuel témoignent de l'abandon progressif des comportements consensuels de coopération au profit des comportements concurrentiels. On voit apparaitre des comportements court-termistes, le niveau de la concentration augmente faisant émerger des firmes de grande taille cherchant à manipuler le marché. Dans le même temps, les firmes de la filière dépendent de nouveaux acteurs (banques, logisticiens, assureurs) en l'absence d'investissements durables.

[47] L'estimation de la limite haute est faite sur la base des coûts de production de Nyrstar qui évalue le coût de production d'une tonne du concentré à 500 $/t (équivalent à 1436 $/t du zinc selon la méthode C1). Le prix résiduel d'une tonne de concentré contenant 50% du contenu métallique payable à 85% avec le prix du zinc de 2000 $/t est de 850 $/t. Ce montant est augmenté de 25% pour tenir compte de la présence des autres métaux. On obtient donc une valeur résiduelle 1062 $/t. On en déduit la limite haute de la TC à 562 $/t. Les coûts opérationnels de Nyrstar sont estimés à 800 $/t du métal (pour simplifier on considère que la transformation d'une tonne du concentré contenant 50% du métal coûte 400$/t). Les revenus autres que la TC représentent environ 45% , ce qui nous donne le seuil minimum de la TC à 225 $/t.

Pourtant, l'abandon du contrôle de la filière par les mineurs et les transformateurs n'est pas inévitable. Pour cela, les firmes de la filière doivent faire preuve d'une coopération renforcée qui passerait non seulement par le partage des profits, mais également par le partage des investissements. De cette manière, elles ferment l'accès des nouveaux acteurs aux fonctions intermédiaires, car ces fonctions seront remplies par les firmes existantes de la filière. Il s'agit donc d'une nouvelle définition des métiers de la filière sans perdre la main sur leurs activités principales.

Comment favoriser la création de valeur au sein de la filière sans briser l'équilibre des approvisionnements ni favoriser l'émergence d'acteurs dominants et court-termistes ? Nos simulations montrent que seule la modification du taux de recouvrement et la réduction des coûts de fonctionnement et/ou de transport augmentent les profits individuels sans désavantage collectif. Ce sont les stratégies poursuivies par les transformateurs des pays développés puis émergents depuis 30 ans, avec succès.

Nous proposons donc que les transformateurs acceptent une baisse de la quantité de 'free metal' pour reconstituer une partie de la marge des mineurs, contre des investissements dans les infrastructures de transport et de stockage dans la filière. Cette solution coopérative sera difficile à mettre en oeuvre, mais l'alternative concurrentielle vers laquelle l'industrie se dirige ne semble pas mieux à même de pérenniser l'approvisionnement du marché du zinc.

Le défi à relever est bien celui de l'augmentation des profits (individuels) à niveau de coordination constant. Nous recommandons aux firmes de la filière de procéder à l'amélioration de l'efficacité de la production : amélioration du taux de recouvrement pour les transformateurs et baisse des coûts opérationnels et de transport pour toutes les firmes de la filière. Conformément à nos simulations, cette solution a l'avantage d'améliorer le profit individuel sans baisser le profit des autres firmes de la filière. L'intégration verticale correspond à une autre solution de captation du profit dans un contexte de multiplication des acteurs de la filière, mais cette solution présente l'inconvénient d'être à la portée uniquement des firmes de taille déjà considérable.

Si toutefois la filière échoue à se réinventer, les causes de cet échec sont à chercher dans le comportement individuel opportuniste des mineurs et des transformateurs. Actuellement, la majorité des transactions du concentré repose sur les accords de long terme utilisant la TC, le peu de transactions restantes utilisant les contrats spot ou les opportunités de *tolling*. La fillière changeante pourrait s'orienter vers ces deux alternatives. Ce présage n'est pas optimiste, car ces changements vont de pair avec une intégration verticale généralisée ou bien à un *squeeze* du marché par les acteurs dominants. De plus, ce phénomène serait naturellement associé à une réduction de la durée des contrats de long terme, ce qui est en accord avec les conclusions de Kozhevnikova et Lange (2009).

Avec le *tolling*, les firmes de la filière retrouvent l'arrangement contractuel de l'intégration verticale. L'aboutissement de la logique individualiste de court terme entraînant la fin de la TC peut donc se traduire par la domination de quelques firmes procédant à une intégration verticale et se servant d'une variable de transfert (prix du *tolling*[48]).

L'usage généralisé du tolling nous semble être une solution peu probable en raison de l'hétérogénéité du concentré qui empêche la domination des mineurs. L'utilisation plus généralisée du contrat spot correspond à l'évolution de la TC vers une variable de prix associée à l'apparition de nouveaux acteurs que nous présentons dans la partie suivante.

III.2 L'apparition de nouveaux acteurs

Le rapprochement de la TC d'une variable de prix signifierait l'abandon du fonctionnement en "serpent dans le tunnel" au profit du fonctionnement par tâtonnement pour atteindre la TC d'équilibre à laquelle sont associées les quantités de concentré d'équilibre. Nous avons déjà évoqué la faible probabilité du fonctionnement de la filière du zinc en CPP ; ainsi l'évolution de la TC vers une variable de prix ne va pas forcément améliorer le fonctionnement de la filière en raison des coûts élevés d'entrée sur le marché. La disparition de la TC tout court, sans proposer une alternative viable de coordination traduirait une structure intégrée verticalement où les décisions de coordination se prennent par les décideurs au sein des firmes intégrées.

Les firmes doivent faire face à des défis dont la portée dépasse leurs compétences en faisant appel à des intermédiaires spécialisés. Le souhait des firmes de se concentrer sur leur cœur de métier ne devrait cependant pas mettre en danger l'indépendance de leurs activités liée à la production. Nous constatons l'apparition progressive d'intermédiaires qui remplissent des fonctions support de la filière du zinc. La place prise par ces intermédiaires s'explique par la complexification de la filière et les risques qui y sont associés. Les mineurs et les transformateurs, incapables de gérer ces risques, les délèguent à ces nouveaux acteurs.

En amont de la filière on note la présence active des sociétés d'exploration qui achètent les droits d'exploitation des mines pour ensuite les revendre aux mineurs lorsque ceux-ci souhaitent développer leur activité. En support de la négociation du concentré, les négociants et les intermédiaires logistiques viennent s'intercaler entre mineurs et transformateurs dans un contexte de développement des contrats de court terme.

[48] Le *tolling* est utilisé par le transformateur russe CZP qui est rémunéré à hauteur d'environ 800 $/tonne. Cette valeur est à comparer avec le revenu des transforamteurs issu du contrat du concentré. Les transformateurs utilisant la TC peuvent obtenir un revenu plus important grâce à l'indexation de la TC sur le prix du métal et à la vente du 'free metal'.

La légitimé grandissante de ces nouveaux acteurs vient de l'impossibilité pour les acteurs traditionnels de gérer les approvisionnements dans un contexte incertain. M. Mo Ahmadzadeh de Mitsui Bussan Commodities résume l'impossible utilisation généralisée des contrats spots : "The world can't go around on a spot basis" [49]. On constate cependant que le nombre d'affaires basées sur ces contrats augmente. Certaines firmes vont jusqu'à dénoncer les contrats en cours préférant payer les pénalités d'annulation et profiter d'arbitrage de court terme[50].

Les firmes de la filière font face à des contraintes supplémentaires relatives au financement des projets. Il s'agit de financements assez importants qui impliquent l'intervention des banques souvent associée à une levée de fonds en bourse. Ainsi, dans certaines circonstances les firmes tendent à privilégier des décisions à fort impact positif sur leur capitalisation boursière ou bien sur leurs ratios comptables et financiers au détriment de décisions allant dans le sens de coordination de la filière. Cette nouvelle contrainte touche même les géants de l'industrie, ce dont témoignent les récentes déboires de Glencore relatifs à son niveau d'endettement (Laurent et Kar-Gupta, 29 septembre 2015)[51] .

La gestion des flux physiques est également un point critique où les firmes de la filière s'exposent aux nouveaux risques. Le timing des opérations de transport n'est plus maîtrisé par les firmes, car le marché du fret maritime est assez concentré. Les firmes de la filière n'ont d'autre choix que d'accepter le temps de transport qui leur est imposé. De plus, la présence des armateurs au sein des structures portuaires les rend décideurs des choix d'infrastructure, comme c'est déjà le cas en ce qui concerne la refonte des ports européens (Mamou, 2009). Les décisions de développement des ports particuliers prises par les armateurs ont un impact considérable sur le fonctionnement des firmes de la filière, dépendantes de l'infrastructure.

Ce constat va dans le sens de notre préconisation sur un nécessaire investissement dans l'infrastructure de la part des sociétés de la filière si elles souhaitent minimiser les risques liés aux flux physiques. Cette stratégie fait renvoi à l'exemple du marché du gaz naturel où une partie des producteurs s'investit dans les fonctions support telles que le transport et l'exploitation des terminaux (voir Hallouche *et al.* (2006)).

Nous avons démontré dans notre travail que l'équilibre concurrentiel de la filière est caractérisé par l'instabilité. L'évolution de la TC vers une variable de prix devrait éliminer une partie des firmes inefficaces, améliorant l'efficacité de l'allocation des ressources sur le marché. Nous pensons cependant, sur la base de nos conclusions, que le résultat final sera une concentration

[49] Zinc TC benchmark to stick : analysis. Metal Bulletin. 04 Mars 2009.

[50] A titre d'exemple, la TC spot chinoise fluctuait en 2009 entre 155 eur/t et 220 eur/t, alors que la TC benchmark était de 195 eur/t (ANTAIKE, 2011).

[51] "If major commodity prices remain at current levels, our analysis implies that, in the absence of substantial restructuring, nearly all the equity value of both Glencore and Anglo-American could evaporate."

géographique des capacités (dans les mains des transformateurs chinois), assortie d'un rôle déterminant des acteurs gérant le stock : les négociants et logisticiens. Chercher à se rapprocher d'un régime plus concurrentiel reviendrait dans le contexte actuel à créer un monopole de fait sur la fixation du prix pour les intermédiaires les plus puissants.

Les firmes de la filière s'exposent ainsi au danger de perdre le contrôle des opérations et de devenir dépendantes de ces intermédiaires. De plus, le contrôle du stock et l'ingérence dans la contractualisation rend ces intermédiaires concurrents aux firmes de la filière. A terme, ces nouveaux intermédiaires vont réclamer une part du profit partagé entre les mineurs et les transformateurs, en déstabilisant davantage l'équilibre quantitatif de la filière.

Selon Ernst & Young (2009) quatre catégories de risque peuvent être identifiées. Tout d'abord il s'agit des risques relatifs à l'accès aux ressources minières et à l'infrastructure. Ensuite on distingue les risques liés aux opérations minières comprenant l'insuffisance de la main-d'œuvre qualifiée, les risques liés à l'execution des projets et les interruptions de l'approvisionnement. Le troisième groupe correspond aux risques financiers tels que l'allocation du capital, l'importance du fond de roulement nécessaire, la gestion des coûts. Enfin, le quatrième groupe inclut la volatilité de prix et du taux de change. Alors que les deux premières catégories des risques sont intégrées dans les contraintes de production de la filière, les deux dernières catégories de risques sont encore assez mal gérés par les industriels.

Le risque associé aux variations de la TC joue un rôle croissant, compte tenu de la volatilité croissante de la TC spot et du développement des contrats de court terme. Les profits des acteurs de la filière peuvent être sensiblement affectés par les variations de la TC en l'absence d'une solution de gestion de ces risques. Le problème est aggravé par le caractère déstabilisateur des stratégies d'investissement spéculatif sur les stocks de métal et sur les instruments de couverture de la filière.

La question qui se pose alors est de savoir lesquels de ces risques peuvent être des facteurs d'évolution du système actuel de valorisation. A notre avis, seuls les risques financiers et les risques liés à la volatilité des prix et du taux de change (troisième et quatrième groupe) peuvent à notre avis justifier une évolution du système de valorisation. La nécessité de gérer les risques financiers en accord avec une règlementation prudentielle du pays donné peut donner lieu à une évolution de la valorisation au profit d'un prix connu à l'avance.

Néanmoins, cette situation crée un risque de contrepartie et celui de l'execution du contrat, rendant les contrats à prix connu à l'avance peu intéressant s'il sont appliqués uniquement par une partie des firmes. Le risque de prix et le risque de change peuvent justifier le changement du système de valorisation uniquement en absence d'instruments de gestion de ces risques. Or,

même si les transactions sur le concentré métallique se font en dollars américains, le risque de devise et le risque de prix peuvent être gérés à l'aide des outils existants alors. Seule la gestion du risque de la TC correspond à un phénomène nouveau.

Selon nous, le clivage entre firmes traditionnelles et firmes diversifiées va s'approfondir, rendant la négociation de la TC plus complexe et le consensus plus difficile à atteindre. L'avènement d'une TC spot est particulièrement probable compte tenu de la place de la Chine (40% de la capacité mondiale de transformation) dans les échanges de concentré. Les firmes de la filière auront du mal à éviter les transactions avec les sociétés chinoises et se trouveront alors obligées de conclure des contrats basés sur une TC spot "chinoise", avec l'aide des négociants. Ces derniers sont les seuls à avoir actuellement le savoir faire et la capacité de gérer les risques inhérents à ces échanges. Le poids des transformateurs chinois, du groupe des "hétérodoxes" de notre analyse, s'ajoutant au rôle grandissants des acteurs diversifiés va faire évoluer le marché vers un nouveau paradoxe : un cadre plus concurrentiel, dominé par des acteurs de plus en plus concentrés.

La TC évoluera nécessairement vers un rythme de négociation plus soutenu. La priver de son rôle de force de rappel pour le prix résiduel reviendrait de fait à entamer l'offre de transformation actuelle, versatile et nécessaire. Soumettre les transformateurs à un régime plus concurrentiel par la baisse (ou la perte) du revenu du 'free metal' aurait pour conséquence de les enfermer dans une logique de compétitivité prix pénalisante pour la continuité des approvisionnements. Ceci alors que leur pouvoir actuel lié à la gestion des stocks reste faible, contrairement au pouvoir potentiel des négociants dans le système réformé[52].

Le souhait des firmes de se concentrer sur le cœur du métier ne doit pas mettre en danger l'indépendance des activités liée à la gestion des contraintes de production par les intermédiaires. Le renforcement de cette indépendance passerait par l'adoption d'une politique active de couverture, et la fin des délégations de responsabilité en cascade vers les intermédiaires.

[52]En 2002, en raison du faible prix du métal, environ 40% des mines de zinc produisaient du concentré à perte et procédaient à des fermetures temporaires. Ce mouvement de fermeture a crée un déficit d'offre de concentré et a permis aux mineurs d'être en position de force pour renégocier une TC plus faible (Mining Journal, 25 janvier 2002). En 2008, le surplus de concentré et le prix élevé du zinc ont permis aux transformateurs de négocier une TC de 300$/t. Dans le courant de l'année le prix de zinc a baissé d'environ 50% avec la baisse de la consommation d'acier galvanisé. En réponse à la baisse de la demande finale, les mineurs ont réduit leur production d'environ 10% en base annuelle, s'assurant ainsi un avantage pour la négociation de la TC. La TC est fixée à 195$/t l'année d'après).

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exploré les raisons du maintien de la TC dans son équilibre actuel. La structure de la filière et les contraintes de production sont les deux raisons principales du caractère durable et persistant du système actuel de valorisation du concentré. Partant de ce constat nous avons présenté les dynamiques endogènes et exogènes de la filière pouvant être à l'origine de l'évolution du système de valorisation et de la TC. Les conclusions de ce travail font ressurgir les liens entre la structure de la filière et la TC : une évolution de la TC vers plus de flexibilité, la rapprochant d'une variable de prix, est conditionnée par le changement de la structure de la filière.

A travers l'étude d'un questionnaire, nous avons pu établir le caractère hétérogène de la filière de zinc. L'étude des profils des firmes que nous avons réalisée démontre l'existence d'au moins trois profils distincts sur la base de l'attitude face à la TC. Les firmes 'traditionnelles' sont satisfaites du niveau de la TC et ne cherchent pas à remettre en question le système actuel de valorisation. Les firmes 'diversifiées' souhaitent une évolution de la TC vers plus de flexibilité afin de profiter des opportunités de négociation de la TC. Les firmes 'hétérodoxes' sont assez neutres, en raison d'une utilisation peu fréquente de la TC.

La volonté de certains de voir la TC tendre vers une variable de prix met en évidence les clivages entre les firmes de la filière. Nous constatons que le consensus sur la TC actuelle se base sur la structure de la filière et l'absence d'un pouvoir du marché absolu d'un seul groupe de firmes. L'application de la TC est plébiscitée, même si une partie des firmes trouve la TC inadaptée à la réalité du marché. Une TC plus flexible, des négociations plus fréquentes, une liberté de négocier la TC pour chaque contrat, tels sont les souhaits des firmes insatisfaites (mécontentes) de la TC actuelle.

Nous avons simulé les conséquences des changements demandées par les firmes, ce qui permet d'en identifier les gagnants et les perdants. Paradoxalement, les gains en efficacité d'une firme en particulier n'affectent que le profit de la firme en question. Nous avons noté que la modification de la formule de valorisation du concentré en termes de la différence entre la TC fixe et la TC variable aurait un effet asymétrique en augmentant le profit unitaire du mineur et en diminuant le profit unitaire du transformateur. Tous ces éléments nous permettent de conclure de la non-neutralité du mécanisme de la valorisation du concentré.

Nous avons suggéré une application empirique de l'équilibre partiel sur le marché du concentré et du métal. Nous avons modélisé les interactions entre les variables du marché en introduisant la différenciation géographique sur le marché du concentré et un certain nombre de chocs

sur les paramètres du modèle. Les résultats de la modélisation démontrent que les changements des paramètres de production ont un impact sur le profit des firmes et sur les variables du marché. Les contraintes de production se trouvent ainsi modifiées provoquant une évolution de l'organisation actuelle de la filière. Nos conclusions supportent l'idée que les souhaits de changement du système actuel vont introduire les distorsions dans le mécanisme de la valorisation en faveur de tel ou tel groupe des firmes.

La lente évolution de la structure de la filière ne présage pas de modification de la TC à court et moyen terme. Or, les dynamiques exogènes peuvent accélérer le processus de l'évolution de la TC en raison de l'apparition de nouveaux risques et contraintes. Ainsi, l'organisation de la filière se trouvera modifiée, il s'agit de la complexification des métiers des firmes au sein de la filière. On s'attend à l'apparition de nouveaux acteurs spécialisés dans la gestion de ces risques (fonction logistique, de négoce, d'exploration).

Nous estimons que ces changements vont rendre la TC encore plus volatile, exposant ainsi les firmes de la filière au risque de la TC. Néanmoins, nous avons constaté dans le cadre du questionnaire que la majorité des firmes n'a pas recours au hedging de la TC. Dans ces conditions, le souhait d'une évolution de la TC vers plus de flexibilité (et donc plus de volatilité) semble paradoxal. Selon nous, seule la gestion active du risque de la TC permettrait aux firmes de la filière de satisfaire les contraintes de financières de production. Les firmes ayant fait l'effort pour appréhender ces risques et acquérir les compétences nécessaires seront en position favorable pour imposer leurs conditions aux firmes qui se concentrent uniquement sur le cœur de leur métier.

Le mécanisme de partage du profit à l'origine de l'insatisfaction des firmes de la filière offre une opportunité intéressante de relance d'une dynamique de la filière. Le maintien de l'organisation de la filière (malgré les changements exogènes) passerait par une coordination plus importante entre les mineurs et les transformateurs. L'inégalité du partage du profit peut donner lieu à une inégalité similaire des investissements pour répondre aux nouveaux défis. De cette manière, la coordination et la coopération au sein de la filière seront préservés sans pour autant défavoriser les mineurs ou les transformateurs.

Conclusion Générale

"Every concentrate is different and every concentrate has a different value to different smelters. Maybe there should be different TCs for different concentrates, but the industry needs some sort of reference point." Metal Bulletin (04 mars 2009).

Début 2012, la société Glencore a conclu un contrat d'achat de concentré qui ne comprenait pas de TC. Le concentré allait être fourni par le mineur péruvien Volcan et l'absence de la TC était compensée par une clause de participation à 25% de la hausse potentielle du prix du zinc (Farchy, 2012). La conclusion de ce contrat inhabituel a été interprétée par les acteurs sur les marchés de matières premières comme un premier signal des déséquilibres à venir dans l'industrie du zinc, dans un contexte de forte hausse du prix du métal. Ce signal a toutes les caractéristiques d'un *pinch point*[53], concrétisant certains doutes quant à la capacité des mines à satisfaire la demande croissante en zinc dans les années à venir.

Le comportement de la société Glencore offre un bon exemple de remise en question du système actuel de coordination ainsi que d'une anticipation des déséquilibres futurs. Le marché est ainsi plongé dans un contexte inédit car la filière du zinc a toujours réussi jusqu'alors à adapter les volumes de production afin de satisfaire la demande finale. La conclusion d'un contrat sans TC correspond à un précédent lourd de conséquences pour l'industrie de zinc : l'évolution ou la disparition de la TC n'est plus un sujet de discussion, mais une réalité.

Cette thèse de doctorat présente le rôle et le fonctionnement de la TC à travers d'une analyse de la filière de production du zinc métal. Nous avons, au moyen d'une modélisation théorique des conditions des échanges de concentré, proposé un cadre d'analyse basé sur deux hypothèses quant à la nature de la TC. Nous avons confronté ces deux hypothèses à des scénarios prospectifs et à la perception du marché d'un échantillon représentatif des acteurs de la filière. Ces éléments nous ont permis d'établir un pronostic sur les évolutions à venir de la TC et leurs conséquences sur l'équilibre de la filière. Ces deux hypothèses fortes quant à la nature de la TC ont été proposées pour appréhender cet objet dans sa globalité.

Dans le premier chapitre nous avons considéré la TC comme instrument de coordination, variable *benchmark* régissant les transactions entre les mineurs et les transformateurs. Selon nous, les contraintes de production qui pèsent sur la filière sont à l'origine d'un besoin de coor-

[53] Le terme *pinch point* a été proposé par Walter Curlook. Il est associé à un niveau de stock où les consommateurs de matière première s'inquiètent de la sécurité des approvisionnements. Lorsque le stock tombe en deçà du *pinch point*, de légères fluctuations de l'offre peuvent causer d'importantes fluctuations du prix de la matière première concernée (Goldie et Maiman, 1990).

dination des flux physiques entre les firmes de la filière. Notre analyse fait ressortir l'utilisation de la TC comme une véritable variable de partage du profit entre les firmes, assurant ainsi la coordination de la production et la limitation du pouvoir de marché des firmes. L'équilibre technique de la filière est atteint en associant un niveau de la TC à un niveau de production. Nous démontrons empiriquement la réalité de ce lien sur la base d'une étude de la relation de long terme entre la TC, le prix du métal et le stock.

Nous validons alors la première hypothèse : l'utilisation de la TC benchmark participe au partage du profit entre le mineur et les transformateurs. Or, ce partage est inégal : nous démontrons que les mineurs ont systématiquement obtenu un niveau de profit plus élevé que celui des transformateurs. Ce déséquilibre dans la répartition des profits rend les négociations annuelles de la TC de plus en plus conflictuelles et offre un terrain propice au développement de stratégies non-collaboratives. Cependant, nous estimons qu'en raison de l'interdépendance des firmes de la filière, le choix des stratégies individuelles reste très limité, conférant une grande stabilité à l'usage de la TC.

Nous considérons que l'absence de sanction tangible en cas de non-respect des règles de coordination s'explique par l'interdépendance et par l'esprit corporatiste qui caractérise la filière dont témoigne la *LME week* 2015[54]. Dans un contexte où le prix du métal atteint des niveaux historiquement bas, les mineurs éprouvent des difficultés que seul le partage du profit via la TC peut régler[55]. La structure de l'industrie et les contraintes de production sont les raisons de l'usage de la TC au détriment du *tolling* ou d'une variable de prix, dont l'usage est fréquent sur d'autres marchés de matières premières. Néanmoins, l'usage de la TC benchmark est critiquable en raison de l'absence d'incitations à aller vers plus d'efficacité. La TC comme seul instrument de coordination produit une situation sous-optimale.

Dans le deuxième chapitre nous modélisons une situation optimale en considérant la TC en tant que variable de prix dans le cadre de la concurrence pure et parfaite. La TC est sélectionnée comme le meilleur candidat au rôle de prix du marché du concentré (comparée avec le prix du zinc et la formule de valorisation du concentré) sur la base des fonctions qu'elle remplit. Nous procédons à une séparation théorique du marché du concentré et du zinc, modélisant ainsi les interactions des firmes dans l'ensemble de la filière. Nous identifions le niveau de production optimal du mineur et du transformateur. Pour le transformateur il s'agit d'un niveau de production égalisant le coût marginal de production à la TC ; pour le mineur il s'agit

[54]La semaine LME est un événement annuel qui a lieu au mois d'Octobre à Londres. Il s'agit d'une série de réunions et de rencontres entre des firmes de l'industrie des métaux, des négociants, des banquiers et des spécialistes de la logistique des métaux

[55]"We all have to be realistic about what we're facing right now and make tough decisions and keep on moving." Richard Adkerson, PDG de la mine Freeport-McMoRan Sanderson et Hume (15 octobre 2015).

d'un niveau égalisant le prix du métal à la somme du coût marginal de production et de la TC pondérés par le contenu métallique. Sur le marché du zinc, le prix d'équilibre issu du programme des agents n'est donc pas analytiquement unique. Ceci démontre la difficulté de définir le rôle et la nature de la TC.

Nous validons partiellement la seconde hypothèse : la TC spot peut être validée comme une variable de prix ; la validation de la TC de base est partielle. Notre application empirique met ainsi en avant les différences de nature entre la TC de base et la TC spot. La TC de base reflète l'équilibre de long terme de l'industrie, elle est donc caractérisée par un temps d'ajustement plus long et par un comportement pseudo-cyclique, témoignant du déplacement pendulaire du pouvoir de marché entre les mineurs et les transformateurs. Plus volatile, la TC spot intègre les fluctuations du prix du métal, sans pour autant reproduire celles-ci à l'identique.

Le processus autorégressif qui caractérise la TC spot, confirme son évolution progressive vers une valeur d'équilibre. Or, l'existence de celle-ci est étroitement liée à notre cadre de modélisation en concurrence pure et parfaite, avec des hypothèses très restrictives. Alors que la solution consistant à faire tendre les échanges du concentré vers un cadre de plus en plus concurrentiel peut paraître plus souhaitable, nous prenons le parti de critiquer cette évolution. Selon nous, le rapprochement de la TC d'une variable de prix issue de ce cadre de modélisation aboutira à un équilibre instable, ouvrant à une concentration encore plus importante de la filière.

Notre étude des hypothèses 1 et 2 sur la nature de la TC a donc fait ressortir les liens entre la structure de la filière, le partage des profits et la TC. La stabilité de l'organisation de la filière réside dans l'équilibre entre ces trois paramètres. Une instabilité importante ou une modification de l'un de ces trois paramètres impliquerait un changement des deux autres. Ce constat nous amène à nous interroger dans le troisième chapitre sur les évolutions de cette relation. Selon nous le fonctionnement optimal de la filière dans le cadre de la CPP est instable, seul le fonctionnement sous-optimal en concurrence imparfaite (l'oligopole bilatéral) peut être qualifié de stable. Cette conclusion nuance notre réponse à la question du maintien de la TC dans son état actuel.

Nous estimons que la TC joue un rôle stabilisateur de l'équilibre de la filière en raison de son caractère négocié. Ainsi, les négociations consensuelles permettent d'obtenir un niveau de la TC satisfaisant pour toutes les firmes. Il s'agit donc d'éviter une TC trop basse ou trop élevée pour ne pas pénaliser une partie des firmes de la filière. Si la TC se rapproche trop des valeurs extrêmes, l'équilibre de la filière ne sera plus assuré, pénalisant la totalité des firmes. Pour cette raison, il n'y a donc pas de "menace" associée à un comportement du passager clandestin, car la probabilité de développer ce comportement est très faible. En revanche, le problème se pose

pour les firmes qui ne sont pas impliquées dans les opérations physiques. Ne supportant pas les contraintes de production et n'éprouvant pas le besoin de coordination, ces firmes sortent du cadre de coopération régi par la TC.

Ces comportements conduisent un certain nombre de firmes au sein de la filière à considérer que la TC est inadaptée à la réalité du marché. Pour cette raison ces firmes souhaitent une évolution de la TC. Pour l'instant il ne s'agit pas d'une évolution de la TC issue des changements au sein de la filière (facteurs endogènes), mais uniquement d'une réponse attendue aux défis posés par les changement de l'environnement de production (facteurs exogènes). Une modification de la TC ne peut se faire que par une évolution vers deux extrêmes : soit vers une variable de prix soit vers une solution du type *tolling*.

Une TC plus flexible, des négociations plus fréquentes, une liberté de négocier la TC pour chaque contrat, tels sont les souhaits des firmes insatisfaites (mécontentes) de la TC actuelle. Nous identifions les firmes défendant une évolution de la TC grâce aux données issues d'un questionnaire adressé à un échantillon représentatif de la filière. Ce groupe de firmes désirant le changement sont des firmes à forte activité de négoce : elles ont donc un intérêt direct à voir les volumes des échanges augmenter, même si cela ne correspond à aucun besoin de matière physique.

Nous modélisons les impacts des changements pressentis de la TC et de la valorisation du concentré et nous concluons qu'ils ne sont pas neutres : il y aura des gagnants et des perdants. Dans une filière ou aucun acteur ou groupe d'acteur n'est encore assez puissant pour imposer sa volonté, ceci garantit une absence d'évolution endogène en suivant l'un des scénarios que nous proposons. L'évolution viendra d'un choc extérieur déstabilisant durablement certains acteurs de la filière.

Nous concluons ce dernier chapitre par une étude prospective. Il est clair que la filière se trouve à un tournant de son évolution : le métier des mineurs et des transformateurs se complexifie. Selon nous, l'organisation de la filière peut évoluer soit vers plus de concurrence, soit vers plus de coordination. Un niveau de concurrence plus important au sein de la filière permettra l'entrée de nouveaux acteurs intermédiaires qui vont écarter progressivement les mineurs et les transformateurs des négociations de la TC, voire supprimeront complètement la TC. Ceci ne pourra que tirer la filière vers une vison de court terme incompatible avec les contraintes physiques du métier.

Il semble au contraire que dans un environnement uncertain, les acteurs ont intérêt à une coordination plus forte pour garantir la sécurité des approvisionnements. Notre travail prouve clairement que cette coordination passera par une réorganisation du mécanisme de partage du

profit et par le partage des investissement pour assurer les fonctions logistiques, financières et de couverture. De cette manière, les firmes de la filière pourront limiter leur dépendance vis-à-vis des intermédiaires tout en fournissant un niveau de service équivalent. Nous préconisons donc le maintien de la TC associé à des stratégies de couverture du risque de la TC développés en interne ou en concertation au sein de la filière.

Ce travail doctoral s'achève soulignant de par les conclusions offertes l'important travail encore à accomplir et un agenda de recherche prometteur. Le développement du modèle théorique que nous avons proposé pour simuler les évolutions du marché vers des cadres plus réalistes en termes de structure (l'oligopole, l'oligopole avec frange et la concurrence monopolistique) constitue une première étape évidente. Ainsi, plutôt que de raisonner dans le cadre de la CPP il serait opportun de modéliser les inégalités entre les firmes en termes d'élasticités prix ainsi qu'en termes de quantités produites et offertes. Ces modifications amèneraient à considérer les échanges entre les firmes et/ou entre les pays et ouvrent un grand éventail d'applications possibles avec des sujets de commerce international, de la théorie des contrats et de l'économie industrielle.

La compréhension du fonctionnement des firmes transformatrices constitue également un axe de recherche prometteur. En effet, ce sont les choix de production et d'approvisionnement qui nous semblent particulièrement intéressants. En fonction du prix du métal et du niveau de la TC, le transformateurs optimise sa production en procédant à l'achat d'un concentré riche ou pauvre en métal. Ce calcul financier est à mettre en parallèle des capacités de production du transformateurs et des limites en termes de capacités minimales et maximales pour chaque étape de production.

Pour prolonger l'exploration des méthodes de coordination au sein des filières des métaux non ferreux, une des pistes d'approfondissement de notre travail consisterait à appliquer notre méthodologie au marché du cuivre, de l'aluminium et du plomb. La comparaison des structures et des niveaux des charges de traitement permettrai de déterminer ce qui relève des effets attendus d'un mécanisme de type TC, et ce qui dans nos conclusions relève des spécificités physiques du marché du zinc. De même, la transposition de la logique du partage du profit à celle des investissements est une idée méritant plus amples considération.

Nous avons défini la TC comme un phénomène particulier au marché des métaux non-ferreux. Or, d'autres méthodes de valorisation doivent, selon nous, être mieux comprises. Il s'agit notamment de l'usage des prix publiés par le Metal Bulletin en tant que prix de transaction (c'est notamment le cas du cadmium ou du molybdène). Ainsi, les transactions ont pour référence un prix aléatoire utilisé dans les contrats de firmes inconnues ou bien rapporté volontairement par ces firmes. Le recours à ce type de méthode de valorisation traduit une relation

de confiance entre les co-contractants. Ce type de valorisation crée les condition d'une prophétie auto-réalisatrice où les anticipations des firmes posent les conditions de la convergence du prix de marché vers le niveau attendu. Ceci est évidemment une source d'emballement spéculatif. Ce sujet constitue donc un terrain d'étude prometteur sur l'impact des formules de valorisation sur la stabilité des marchés de matières premières.

Enfin, l'actualité récente nous fournit une nouvelle illustration des risques associés à l'implication des acteurs, principalement financiers comme la société Glencore, et certains fonds d'investissement (ex. Noble Group) sur les marchés de matières premières. Il existe un arbitrage implicite entre le savoir-faire et les moyens financiers que ces acteurs pourraient apporter sur les hypothétiques marchés des concentrés métalliques. Leur action pourrait donc être potentiellement spéculative et déstabilisatrice. Il convient donc de procéder à une étude coût/bénéfice afin de juger de l'impact réel de leur présence sur le marché.

Notre travail appelle finalement à une surveillance du niveau de la TC. Nous avons établi que le niveau de la TC est un indicateur avancé des déséquilibres au sein de la filière. Par conséquent, il serait souhaitable qu'une mise en relation du niveau de la TC avec la structure de la filière soit réalisée de façon systématique, avant chaque tour de négociations. Suivre et révéler ainsi l'information contenue dans la TC permettrait d'améliorer la coordination et donc de rapprocher la filière de l'optimum.

Nous estimons finalement que malgré le ralentissement de l'économie chinoise, les échanges de concentré avec la Chine vont s'intensifier, ce qui se traduira potentiellement par une évolution progressive de la TC vers une variable de prix. Ce n'est pas pour autant le signe annonciateur de la fusion entre la TC de base et la TC chinoise. Dans une logique qui pourrait s'appliquer à de nombreux domaines de l'économie, le mécanisme de la TC gagnerait à s'adapter à la réalité chinoise afin de développer l'usage de la TC existante en Chine et d'enrichir ainsi la réalité du marché. La TC serait potentiellement diluée (ainsi que le pouvoir de marché des firmes), mais une source majeure de déstabilisation externe s'en trouverait ainsi supprimée.

Nous concluons ce travail conscients que *"la suite sera sans nul doute passionnante pour les acteurs comme pour les analystes."*

Bibliographie

Société Chimique de France. URL http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/donnees/metaux/zn/texzn.htm. accédé le 25 juin 2015. 31, 33, 43, 45

Noranda réduira sa production d'acide sulfurique et de zinc. *Le Journal Saint-François*, 25 février 2009. Salaberry-de-Valleyfield, QC, Canada. 45

B. Achzet et C. Helbig : How to evaluate raw material supply risks-an overview. *Resources Policy*, 38(4):435–447, 2013. 6

W. Ahrens et V. R. Sharma : Trends in Natural Resource Commodity Prices : Deterministic or Stochastic ? *Journal of Environmental Economics and Management*, 33(1):59–74, 1997. 145

V. Ahti : Forecasting Commodity Prices with Nonlinear Models. Helsinki Center of Economic Research, 2009. Discussion Paper num 268. 294

M. Angel et H. Bhal : Glencore tightens grip on global zinc market. Rap. tech., Reuters Metal Insider, London, 2012. 57

Angel Broking : Hindustan Zinc. Rap. tech., Angel Broking, 2008. 2

M. Anokye et F. T. Oduro : Cobweb Model with Buffer Stock for the Stabilization of Tomato Prices in Ghana. *Journal of Management and Sustainability*, 3(1):155–165, 2013. 146, 156

ANTAIKE : Chinese Zinc Quarterly. Rap. tech. 31, Beijin Antaike Information, Beijin, 2011. 218, 243

K. J. Arrow et G. Debreu : Existence of an Equilibrium for a Competitive Economy. *Econometrica*, 22(3):265–290, 1954. 110, 113

S. Avdasheva : Tolling Arrangements in the Russian Industries : An Institutional Perspective. *Est-West Journal of Economic and Business*, 5(2):217–240, 2002. 93

R. U. Ayres : Metals recycling : economic and environmental implications. *Resources, Conservation and Recycling*, 21(3):145–173, nov. 1997. 227

R. U. Ayres : The second law, the fourth law, recycling and limits to growth. *Ecological Economics*, 29(3):473–483, juin 1999. 227

J. Baffes : More on the Energy / Non-Energy Commodity Price Link. The World Bank, 2009. Working Paper WPS4982. 120, 121

D. L. Bandalos et M. R. Boehm-Kaufman : Four Common Misconceptions in Explanatory Factor Analysis. *In* C. E. Lance et R. J. Vandenberg, éds : *Statistical and Methodological Myths and Urban Legends*, chap. 3, p. 62–85. Routledge, New York, 2009. 194

P. Barett et P. Kline : The observation to variable ratio in factor analysis. *Personality Study & Group Behaviour*, 1(1):23–33, 1981. 193

C. I. Barnard : *The Functions of the Executive*. Harvard, 30th anniv édn, 1938. 75

A. Barrière : *Macroéconomie keynésienne. Le projet économique de John Maynard Keynes*. Bordas, Paris. 112

J. E. Bartlett, J. W. Kotrlik et C. C. Higgins : Organizational Research : Determining Appropriate Sample Size in Survey Research. *Information Technology, Learning, and Performance Journal*, 19(1):43–50, 2001. 193

W. J. Baumol, J. C. Panzar, R. D. Willig, E. E. Bailey, H. C. Qutfrnbach et H. B. Jovanovich : *Contestable Markets and The Theory of Industry Structure*. Harcourt Brace Jovanovich Inc., New York, 1982. 113

J. Bertrand : Théorie Mathématique de la Richesse Sociale par L.Walras. *Journal de Savants*, 48:499–508, 1883. 29, 72

A. Beylot et J. Villeneuve : Assessing the national economic importance of metals : An Input–Output approach to the case of copper in France. *Resources Policy*, 44:161–165, juin 2015. 225

J. Björnerstedt et J. Stennek : Bilateral oligopoly. Rap. tech., 2001. Working Paper num FS IV 01-08. 97

F. Black et M. Scholes : The Pricing of Options and Corporate Liabilities. *The Journal of Political Economy*, 81(3):637–654, 1973. 180

M. Blaug : Is competition such a good thing ? static efficiency versus dynamic efficiency. *Review of Industrial Organization*, 19(1):37–48, 2001. 113

P. Bolton et M. Whinston : Incomplete Contracts, Vertical Integration, and Supply Constraints. *Review of Economic Studies*, 60(1):121–148, 1993. 75

R. Börger, A. Cartea, R. Kiesel et G. Schindlmayr : Cross-commodity analysis and applications to risk management. *Journal of Futures Markets*, 29(3):197–217, 2009. 225

R. Bourbonnais : *Econométrie*. Dunod, Paris, 9e édn, 2015. 86

A. Bouët, C. Estrades et D. Laborde : Differential Export Taxes along the Oilseeds Value Chain : A Partial Equilibrium Analysis. *American Journal of Agricultural Economics*, 96 (3):924–938, 2014. 182

A. Bowley : Bilateral monopoly. *The Economic Journal*, (25):651–659, 1928. 74

G. Box et G. Jenkins : *Time Series Analysis, Forecasting and Control*. Holden-Day, San Francisco, 1970. 155, 290

B. S. Boyanov, M. P. Sandalski et K. I. Ivanov : Zinc Sulfide Concentrates and Optimization of their Roasting in Fluidezed Bed Reactor. *Engineering and Technology*, 49:326–332, 2011. 15, 44, 45, 62, 273

M. Brennan : The Supply Storage. *The Americain Economic Review*, 48(1):50–72, 1958. 82, 108

Brook Hunt : Lead Metal Service : April 2008. Rap. tech., London, 2008. 2

Brook Hunt : Metals Cost Service Insight. Rap. tech., London, 2010. 2, 136

A. Brooke, K. David, A. Meeraus et R. Raman : *GAMS. Language guide.* Num. 2.25. GAMS Development Corporation, Washington, DC, 1997. 182

C. Bruneau et J.-P. Nicolai : Comportements, croyances et lois causales. Exemple du marché à terme du brut. *Annales d'Economie et de statistique*, 22:129–152, 1991. 120, 121, 122, 137, 143, 153

F. Candau : Urban costs, trade costs and tax competition. *Revue d'Economie Politique*, 118 (Octobre):625–661, 2008. 225

P. Cashin, C. McDermott et A. Scott : Booms and slumps in world commodity prices. *Journal of Development Economics*, 69(1):277–296, oct. 2002. 121, 156

M. Cehlár et I. Cehlárová : Economic Variables of the Mineral Project like the Factors Affecting Cash Flow. *Acta Montanistica Slovaca*, 12(2):133–139, 2007. 1, 131

A. Chatrath, B. Adrangi et K. K. Dhanda : Are commodity prices chaotic ? *Agricultural Economics*, 27(2):123–137, 2002. 145, 156

M.-H. Chen, K. W. Clements et G. Gao : Three facts about world metal prices. Rap. tech., Business School University of Western Australia, Working Paper, 2012. 8, 184

G. Chêne et M. Savès : Principaux outils en statistique. Campus Numérique SEME, 2008. Bordeaux. 193

CHR Metals Limited : Dynamic Cost Curves. Rap. tech., CHR Metals Limited, Surrey, 2005. 15

CHR Metals Limited : Dynamic Cost Curves. Rap. tech., CHR Metals Limited, Surrey, 2007. 135, 136

R. H. Coase : The nature of the firm. *Economica*, 4:386–405, 1937. 75, 108

W. G. Cochran : *Sampling Techniques.* John Wiley and Sons, Inc, New York, 1963. 193

Comission Européenne : REACH - Enregistrement, Évaluation, Autorisation et Restriction des Produits Chimiques, 2013. URL `http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/chemicals/reach/index_fr.htm`. accédé le 01 septembre 2015. 225

A.-A. Cournot : *Recherches sur les principes mathématiques de la théorie des richesses.* Hachette, Paris, 1838. 29, 74

P. Crowson : Mining industry profitability ? *Resources Policy*, 27(1):33–42, mars 2001. 6, 135

J. T. Cuddington et L. Dagher : A Primer on Estimating Short and Long-Run Elasticities : Energy Sector Applications. *Quarterly Journal of the IAEE's Energy Economics Education Foundation*, 36(1):1–35, 2011. 87

J. T. Cuddington et D. Jerrett : Super Cycles in Real Metals Prices ? *IMF Staff Papers*, 55(4):541–565, août 2008. 121

J. T. Cuddington et D. Jerrett : Business Cycle Effects on Metal and Oil Prices : Understanding the Price Retreat of 2008-2009. Colorado School of Mines, 2011. 87, 121, 156

P. Dasgupta et G. Heal : *Economic Theory and Exhaustible Resources*. Cambridge University Press. Cambrdge, 1979. 111

DATASTREAM : Thomson Reuters Datastream, 2015. 292

G. a. Davis et J. E. Tilton : The resource curse. *Natural Resources Forum*, 29(3):233–242, août 2005. 111

G. A. Davis et J. E. Tilton : Why the resource curse is a concern. *Mining engineering*, (April):29–32, 2008. 111

A. Deaton et G. Laroque : On the Behaviour Prices of Commodity. *The Review of Economic Studies*, 59(1):1–23, 1992. 121, 145, 156

S. Dées, P. Karadeloglou, R. K. Kaufmann et M. Sánchez : Modelling the world oil market : Assessment of a quarterly econometric model. *Energy Policy*, 35(1):178–191, 2007. 48, 87

D. Dickey et W. Fuller : Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American Statistical Association*, 74:427–431, 1979. 84

D. Dickey et W. Fuller : Likelihood ratio statistics for autoregressive time series with a unit root. *Econometrica*, 49:1057–1072, 1981. 84

G. Dooley et H. Lenihan : An assessment of time series methods in metal price forecasting. *Resources Policy*, 30(3):208–217, 2005. 145, 294

F. Y. Edgeworth : The Pure Theory of Monopoly. *Papers Relating to Political Economy ed.1925*, 1, 1897. 107

G. Elliott, T. Rothenberg et J. H. Stock : Efficient tests for an autoregressive unit root. *Econometrica*, 64(4):813–836, 1996. 84

R. Engle et C. Granger : Co-integration and error correction : Representation, estimation and testing. *Econometrica*, 55:251–276, 1987. 87

R. Engle et S. Yoo : Forecasting and Testing in Cointegrating Systems. *Journal of Econometrics*, 35:143–159, 1987. 82, 83, 85

Ernst & Young : Mining and Metals Refining IFRS. Rap. tech., Ernst & Young, mars, 2009. 244

C. Eskdale : Glencore. *In Deutsche Bank Metals and Mining Conference*, num. 5 Novembre, 2013. 232

Euromin : Benchmark TC database, 2014. 10, 292

B. Everitt : Multivariate Analysis : the Need for Data, and other Problems. *British Journal of Psychiatry*, 126(3), 1975. 193

M. Ezekiel : The Cobweb Theorem. *Quarterly Journal of Economics*, 52(2):255–280, 1938. 103, 154

F. J. Fabozzi, R. Fuss et D. G. Kaiser : *The Handbook of Commodity Investing*. John Wiley and Sons, Inc, New Jersey, 1 édn, 2008. 294

L. R. Fabrigar, D. T. Wegener, R. C. MacCallum et E. J. Strahan : Evaluating the use of Explonatory Factor Analysis. *Psychological Methods*, 4(3):272–299, 1999. 193

M. Falkowski : Financialization of commodities. *Contemporary Economics*, 5(4):4–15, déc. 2011. 226

E. F. Fama et K. R. French : Business cycles and the behaviour of metal prices. *Journal of Finance*, 43(5):1075–1093, 1988. 82

J. Farchy : Glencore strikes bullish zinc deal. *The Financial Times*, (28 février):1–2, 2012. 249

J. D. Farmer et F. Lillo : The Long Memory of the Efficient Market. *Studies in Nonlienar Dynamics & Econometrics*, 8(3):1–35, 2004. 189

W. K. Farr et R. A. Lord : A Varying Parameter Model of Collusion in the Steel Industry. *In Western Economic Association International, annual meeting*, p. 1–30, Denver, Colorado, 2003. 195

F. M. Fisher, P. H. Cootner et M. N. Baily : An econometric model of the world copper industry. *The Bell Journal of Economics and Management Science*, 3(2):568–609, 1972. 120

C. C. D. Fontenay et J. S. Gans : University of Melbourne. Working Paper. 75

J. Frankel et A. K. Rose : Determinants of Agricultural and Mineral Commodity Prices. HKS, Harvard University, 2010. Working Paper RWP10-038. 120

R. Fraser : On the Relationship between Exploration and Extraction. *Australian economic papers*, 25(46):135–143, 1986. 226

M. Friedman : *The Methodology of Positive Economics*, vol. II, p. 3–43. University of Chicago Press, Chicago, 1953. 102

M. Friedman : The Role of Monetary Policy. *The Americain Economic Review*, LVII(1), 1968. 110

M. Friedman et R. Friedman : *Free to choose : a personal statement*. Harcourt Brace Jovanovich, New York, 1979. 22, 102, 109

H. Geman et W. O. Smith : Theory of storage , inventory and volatility in the LME base metals. *Resources Policy*, 38(1):18–28, 2013. 8, 82

V. Géronimi, L. Mathieu et A. Taranco : La nature des fluctuations des cours des matières premières. *Economie et Sociétés. Série Relations économiques internationales*, p. 1527–1552, 2003. 145

S. Ghosh, C. Gilbert et A. Hughes : *Stabilizing Speculative Commodity Markets*. Clarendon, Oxford, 1987. 120

L. A. Gil-Alana, S. Chang, M. Balcilar, G. C. Aye et R. Gupta : Persistence of precious metal prices : A fractional integration approach with structural breaks. *Resources Policy*, 44:57–64, juin 2015. 82, 146

D. Giuliodori et A. Rodriguez : Analysis of the stainless steel market in the EU, China and US using co-integration and VECM. *Resources Policy*, 44:12–24, juin 2015. 82

A. Gleich von, R. U. Ayres et S. Gossling-Reismann : *Sustainable Metals Management*. Springer Verlag GmbH., Dordrecht, 2008. 8

V. P. Goldberg et J. R. Erickson : Quantity and Price Adjustments in Long-Term Contracts : A Case Study of Petroleum Coke. *The Journal of Law and Economics*, 30 (2):369–398, 2013. 53

R. Goldie : Net Smelting Return Models and their Use in the Exploration. *Geoscience Canada*, 18(4):159–171, 1991. 15, 93

R. Goldie et R. Maiman : Conference Proceedings. *In Pacific Rim Congress 90 : An International Congress on the Geology, Structure, Mineralisation, Economics and Feasibility of Mining Development in the Pacific Rim*. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Gold Coast, 1990. 249

R. Gorsuch : *Factor Analysis*. Erlbaum, Hillsdale, NJ, 2nd édn, 1983. 193

C. Granger : Some properties of time series data and their use in econometric model specification. *Journal of Econometrics*, 16:121–130, 1981. 87

C. Granger et P. Newbold : Spurious regression in econometrics. *Journal of Econometrics*, 2:111–120, 1974. 87

M. Grinblatt et C. Y. Hwang : Signalling and the Pricing of New Issues. *The Journal of Finance*, 44(2):393–420, 1989. 109

S. J. Grossman et O. D. Hart : The Costs and Benefits of Ownership : A Theory of Vertical and Lateral Integration. *Journal of Political Economy*, 94(4):691, 1986. 108

J. F. Hair, W. C. Black, B. J. Babin et R. E. Anderson : *Multivariate data analysis. A Global Perspective*. Pearson, Boston, 7th édn, 1995. 193

H. Hallouche, M. Tamvakis et B. Train : The Strategies of non-OECD Gas Producers. *Oxford Energy Forum*, (64):16–18, 2006. 243

C. Hanley : Ivernia West losses on lower zinc prices. *Irish Times*, (30 août), 2015. 136

O. Hart et J. Moore : Property Rights and the Nature of the Firm. *Journal of Political Economy*, 98(6), 1990. 108

F. Hayek : *Droit, législation et liberté*, vol. 1. Presses Universitaires, Paris, 1980. 101, 108, 109

F. A. Hayek : *The Mirage of Social Justice*. Routledge and Kegan Paul, 1976. 106

K. Hewitt et T. Wall : *The zinc industry*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2000. 15, 120, 180

A. Home : Zinc's infinitely strechable deficit deadline. *Reuters Metal Insider*, p. 1–3, 12 juin 2015. 224

A. Home : Another wobble in the zinc deficit story, 2014. 30

C. H. Hommes : Dynamic of the cobweb model with adaptative expectations and nonlinear supply and demand. *Journal of Economic Behavior and Organization*, (24):315–335, 1994. 146

C. H. Hommes : On the consistency of backward looking expectations. The case of the cobweb. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 33:333–362, 1998. 146

H. Hotelling : The Economics of Exhaustible Resources. *The Journal of Political Economy*, 39:137–175, 1931. 14, 29

R. Hubbard : Supply shocks and price adjustment in the world oil market. *The Quarterly Journal of Economics*, 101(1):85, 1986. 82

R. Inderst et C. Wey : Bargaining, mergers, and technology choice in bilaterally oligopolistic industries. Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung, 2001. Working Paper FS IV 01-19. 75

International Zinc Association : 2014 Annual Report. Rap. tech., IZA, Bruxelles, 2014. 40

G. D. Israel : Determining Sample Size. University of Florida, Gainesville, 1992. Fact sheet PEOD-6. 192, 193

D. Jerrett et J. T. Cuddington : Broadening the statistical search for metal price super cycles to steel and related metals. *Resources Policy*, 33(4):188–195, déc. 2008. 121

S. Johansen : Statistical analysis of cointegration vectors. *Journal of Economic Dynamics and Control*, (12):231–254, 1988. 83, 86

S. Johansen : Estimation and hypothesis testing of cointegration vectors in Gaussian vector autoregressive models. *Econometrica*, (59):1551–1580, 1991. 86

S. Johansen : *Likelihood-Based Inference in Cointegrated Vector Autoregressive Models*. Oxford University, Oxford, 1995. 86

S. Johansen et K. Juselius : Maximum likelihood estimation and interference on cointegration with application to the demand of money. *Oxford Bulletin of Economic Statistics*, 52:169–210, 1990. 83

S. Johansen et K. Juselius : Testing structural hypothesis in a multivariate cointegration analysis of the PP and UIP for UK. *Journal of Econometrics*, 53(1-3):211–244, 1993. 83

S. Johansen et K. Juselius : Identification of the long-run and the short-run structure : an application to the ISLM model. *Journal of Econometrics*, 63:7–36, 1994. 83

D. Johnston : Biomining-biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials. *Current Opinion in Biotechnology*, 30:4–31, 2014. 44

R. Jovanovic et M. Magdalinovic-Kalinovic : Managing the Quality of Metal Concentrate with the Aim of Profit Maximization. *Megatrend Review*, 3(1), 2006. 39

N. Kaldor : Speculation and Economic Stability. *The review of Economic Studies*, 1:1–27, 1939. 82, 108

D. K. Kellenberg : An empirical investigation of the pollution haven effect with strategic environment and trade policy. *Journal of International Economics*, 78(2):242–255, 2009. 225

C. Kennedy et A. P. Thirlwall : Surveys in applied economics : Technical progress. *The Economic Journal*, 82(325):pp. 11–72, 1972. 110

J. Keynes : *A Treatise on Money.* Haircourt, Brace and Company, New York, 1930. 82

S. Kolenikov : *Applied Econometrical Alanysis in Stata.* Russian School of Economics, 2003. 86

M. Kozhevnikova et I. Lange : Determinants of Contract Duration : Further Evidence from Coal-Fired Power Plants. *Review of Industrial Organization*, 34(3):217–229, juin 2009. 241

K. Kpodar : *Manuel d'initiation à Stata.* CERDI, Clérmont-Ferrand, 2007. 86

T. Kriechbaumer, A. Angus, D. Parsons et M. Rivas-Casado : An improved wavelet–ARIMA approach for forecasting metal prices. *Resources Policy*, 39(1):32–41, 2014. 294

H. Kulmala, J. Paranko et E. Uusi-Rauva : The role of cost management in network relationships. *International Journal of Production Economics*, 79(1):33–43, sept. 2002. 177

W. C. Labys : Commodity price fluctuations : a century of analysis. 2005. 5, 120

L. Laurent et S. Kar-Gupta : Glencore slumps 30 percent as debt fears grow. *Reuters Metal Insider*, p. 1–4, sept. 29 septembre 2015. 243

S. X. Lin et M. Tamvakis : OPEC announcements and their effects on crude oil prices. *Energy Policy*, 38(2):1010–1016, 2010. 198

M. Lonoff : An Economic Overview of the World Copper Market and Computation of the Elasticity of Demand facing Chile and Peru. *In Politicas Commerciales Optimas*, p. 1–34, Buenos Aires, 1981. 156

R. E. Lucas : On the mechanics of economic development. *Journal of Monetary Economics*, 22(1):3–42, 1988. 110

J. Malewski et M. Krzeminska : Dependence of mine revenue on the grade of copper concentrate. *Petrochemical Problems of Mineral Processing*, 48(2):545–554, 2012. 15

Y. Mamou : Grand chambardement en Méditerrannée. *Le Monde*, (3 janvier), 2009. 243

Y. Marquet : *Négoce international des matières premières.* Eyrolles, Paris, 1992. 9, 67, 228

Y. Marquet : Organisation des marches de matieres premieres minérales : prix producteurs ou marches libres ? 2000. 71

A. Marshall : *Principes d'économie politique, Livre IV.* Gordon et Breach, Paris, 1890. 105

K. Marx : *Le capital. Livre I.* Presses Universitaires de France, Paris. 105, 106

Mc Leod Williams : Commodities and Market Outlook. Zinc Presentation. McLeod Williams. Mineral Exploration Group, 2013. 1

R. McAfee et M. Schwartz : Opportunism in Multilateral Vertical Contracting : Nondiscrimination, Exclusivity and Uniformity. *American Economic Review*, 84(1):210–230, 1994. 75

J. McKinnon : Critical values for Cointegration Tests. *In Engle R.F. et Granger C.W.J. Long-run Economic Relationship*, p. 267–276. Oxford University Press, 1991. 85, 276

McKinsey Global Institute : Resource Revolution : Meeting the world's energy, materials, food, and water needs. Rap. tech. Novembre, 2011. 227

R. Meggan : Japan's copper smelters, BHP dispute profit-sharing (Update 2). Rap. tech., Bloomberg, 21 juillet, 2006. 96

Metal Bulletin : Benchmark zinc TCs settle at $194 per tonne. New York, 02 mars 2009. 2

Metal Bulletin : Zinc TC benchmark to stick : analysys. New York, mars 04 mars 2009. 212, 214, 249

Metal Bulletin : China's zinc TCs rise to $120 as miners come back. New York, 19 juin 2009. 2

Metal Bulletin : Zinc treatment charges rise by as much as $50 per tonne in China. New York, 21 aout 2009. 2

Metal Bulletin : Chinese zinc TCs fall ahead of annual talks. New York, 21 octobre 2009. 2

Metal Bulletin : Zinc TC/RC falls to $191 in tight market. New York, 22 fevrier 2011. 1, 2

V. Mignon : *Econométrie. Théorie et applications.* Paris, 2008. 85, 86, 290

Mining Journal : Zinc TC to fall ? London, 25 janvier 2002. 118, 198, 245

M. Moats, E. Guerra, A. Siegmund et J. Manthey : Primary zinc smelter operating data survey. *In Lead-Zinc Proceedings COM 2010*. The Minerals Metals & Materials Society, 2010. 15, 178

A. Moel et P. Tufano : When Are Real Options Exercised ? An Empirical Study of Mine Closings. *Review of Financial Studies*, 15(1):35–64, 2002. 179

G. M. Mudd : The Sustainability of Mining in Australia : Key Production Trends and Their Environmental Implications for the Future. Rap. tech. Octobre, Monash University and Mineral Policy Institute, 2009. 31, 39, 188

D. North : *Institutions, Institutional Change, and Economic Performance*. Cambridge University Press, New York, 1990. 108

NYRSTAR : Introduction to Zinc and Lead Smelting Business. Rap. tech. Novembre, 2009. 1

NYRSTAR : Modeling Nyrstar Mining and Smelting. Rap. tech. Novembre, 2011. 3, 91, 92

M. Osanloo et M. Ataei : Using equivalent grade factors to find the optimum cut-off grades of multiple metal deposits. *Minerals Engineering*, 16(8):771–776, août 2003. 131

J. W. Osborne et A. B. Costello : Best Practices in Exploratory Factor Analysis : Four Recommendations for Getting the Most From Your Analysis. *Practical Assessment, Research & Evaluation*, 10(7):1–9, 2005. 194

J. Osborne et A. Costello : Sample Size and Subject to Item Ratio in Principal Component Analysis. *Practical Assessment, Research & Evaluation*, 9(11), 2004. 194

V. Pareto : *The Mind and Society. A treatise on general sociology*. Dover Publications, New York, 1935. 113

R. S. Pindyck : Optimal Exploration and Production of a Nonrenewable Resource. *Journal of Political Economy*, 86(5):841–861, 1978. 111

R. S. Pindyck : Inventories and the Short-Run Dynamics of Commodity Prices. *The RAND Journal of Economics*, 25(1):141–159, 1994. 82, 121

R. S. Pindyck, D. Rubinfeld et M. Sollogoub : *Microéconomie*. Pearson, Paris, 2005. 73

R. Pindyck : The dynamics of commodity spot and futures markets : a primer. *Energy Journal*, 22(3):1–30, 2001. 108, 121

J. Plachy : Zinc : History of Zinc Prices. Rap. tech., USGS, New York, 1992. 11, 115

Platts : Zinc 2014 benchmark TC seen $10-15 above 2013's sources. Platts McGraw Hill Financial, fevrier 2014. Dana Point, California. 223

N. Postel : *Les règles dans la pensée économique contemporaine*. CNRS, Paris, 2003. 96

K. J. Preacher et R. C. Maccallum : Exploratory Factor Analysis in Behavior Genetics Research : Factor Recovery with Small Sample Sizes. *Behavior Genetics*, 32(2):153–161, 2002. 193, 194

PRICEWATERHOUSECOOPER : Corporate income taxes, mining royalties and other mining taxes. A summary of rates and rules in selected countries. Rap. tech. Juin, 2012. 52, 273

G. RAO : The Relationship between Crude and Refined Product Market : The Case of Singapore Gasoline Market using MOPS Data. University of South Pacific, Munich, 2008. Working Paper 7579. 87, 120, 121

D. RAWLINGS, D. DEW et C. du PLESSIS : Biomineralization of metal-containing ores and concentrates. *Trends in Biotechnology*, 21(1):38–44, 2003. 44

O. REDOULÈS : L ' économie mondiale en 2008 : du ralentissement à la récession. Rap. tech., INSEE, 2008. 12

C. REINHART et E. BORENSZTEIN : The Macroeconomic Determinants of Commodity Prices. International Monetary Fund, Washington D.C., 1994. Working Paper 6979, 41(2) :236-261. 120, 121

C. M. REINHART : Commodity prices : Cyclical Weakness or Secular decline. International Monetary Fund, Washington D.C, 1994. Working Paper, 41(2) :175-200. 120, 121

S. REITZ et F. WESTERHOFF : Commodity price cycles and heterogeneous speculators : a STAR-GARCH model. *Empirical Economies*, 33:231–244, 2007. 146

D. RICARDO : *Des principes de l'économie politique et de l'impôt.* Cambridge, 1817. 105

V. RICH : *The International Lead Trade.* Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 1994. 8

S. ROACHE et N. ERBIL : How Commodity Price Curves and Inventories React to a Short-Run Scarcity Shock. IMF, 2010. Working Paper 10/222. 82

J. ROBINSON : *The Economics of Imperfect Competition.* McMillan, London, 1933. 29

D. ROSENAU-TORNOW, P. BUCHHOLZ, A. RIEMANN et M. WAGNER : Assessing the long-term supply risk for mineral raw materials - a combined evaluation of past and future trends. *Resources Policy*, 34(4):161–175, 2009. 120

R. E. ROSENTHAL : *GAMS — A User ' s Guide.* Num. January. GAMS Development Corporation, Washington, DC, 2012. 182

J. J. ROTEMBERG et G. SALONER : The Cyclical Behavior of Strategic Inventories. *The Quarterly Journal of Economics*, 104(1):73–97, fév. 1989. 82

H. SANDERSON et N. HUME : Miners put on a brave face at LME Week. *Financial Times*, p. 1–2, oct. 15 octobre 2015. 250

A. SCHIPPERS, S. HEDRICH, J. VASTERS, M. DROBE, W. SAND et S. WILLSCHER : Biomining : metal recovery from ores with microorganisms. *Advances in Biochemical Engineering / Biotechnology*, 141:1–47, 2014. 44

C. SEDOR : How the lead market operates. *In Conference Proceedings Battcon*, p. 1–7, 2008. 8, 15, 40

S. Shafiee, E. Topal et M. Nehring : Adjusted Real Option Valuation to Maximise Mining Project Value – A Case Study Using Century Mine. *In Project Evaluation Conference*, p. 21–22, Melbourne, VIC, 2009. 213

H. Simon : Dynamics of Price Elasticity and Brand Life Cycles : An Empirical Study. *Journal of Marketing Research*, 16:439–452, 1979. 75

R. K. Singhal : Mine Planning and Equipment Selection. *In Findings of the 7th International Conference on Mine Planning and Equipment Selection of 1998.*, p. 830, Calgari, 1998. Press, CRC. 15

P. Skeet et K. Santis : Bridging the gap : English courts uphold enforceability of long-term commodity supply contracts. Reed Smith, 2013. 218

M. E. Slade : Market Structure, Marketing Method, and Price Instability. *Quarterly Journal of Economics*, 1991. 176

M. E. Slade : Competing models of firm profitability. *International Journal of Industrial Organization*, 22(3):289–308, mars 2004. 75, 193, 195

D. Smale : View of the Global Development of the World Non-Ferrous Metals and Commodities. Rap. tech. Meeting of APEC Mining Task Force (MTF-8), ILZSG, Beijin, China, 2014. 272

A. Smith : *Recherches sur la nature et les causes de la richesse des nations. Tome I.* Flammarion, Paris, 1776. 104, 105, 108

M. Smith : Sampling Considerations in Evaluating Cooperative Extension Programs. Rap. tech., Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida, 1983. 193

K. Söderberg : Smelter Gross Profit Components. Rap. tech., Boliden, 2012. 1

U. Söderström : Copper smelter revenue stream. Rap. tech. Novemrer, Boliden, 2008. 1

R. M. Solow : A Contribution to the Theory of Economic Growth. *Quarterly Journal of Economics*, 70(1):65–94, 1956. 110

M. Spence : Job Market Signaling. *The Quarterly Journal of Economics*, 87(3):355–374, 1973. 109

H. F. V. Stackelberg : *Market structure and equilibrium.* Springer, Berlin, 1934. 29, 74

Stata Corp. : *Stata : Release 11.* Stata Press, College Station, TX, 2009. 86

P. Sukagawa : Is iron ore priced as a commodity ? Past and current practice. *Resources Policy*, 35(1):54–63, mars 2010. 204

W. Suwala et W. C. Labys : Market transition and regional adjustments in the Polish coal industry. *Energy Economics*, 24(3):285–303, mai 2002. 179

L. Sylwestrzak, K. Baxter, J. Turney et D. Dixon : Galvanox - an opportunity for existing copper flotation concentrator to improve overall project economics. *Hydrocopper*, p. 17–25, 2009. 45

B. G. Tabachnik et L. S. Fidell : *Using multivariate statistics*. Harper and Row, New York, 1996. 205

M. N. Tamvakis et H. A. Thanopoulou : Does quality pay ? The case of the dry bulk market. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 36(4):297–307, 2000. ISSN 13665545. 226

H. Tanguy : Stratégie d ' intégration verticale : efficacité organisationnelle et pouvoir de marché ? *La Jaune et La Rouge*, (79):26–29, 2013. 4

B. Tarnef : Pénurie de Conteneurs. Cargo Cover, 2009. URL `https://www.cargocover.com/fr/pdfs/ContainerShortage.pdf`. accédé le 04 octobre 2015. 226

TECK : Modelling Workshop. Rap. tech., 2012. 1

The World Bank : *Pollution Prevention and Abatement Handbook. Toward cleaner production*. The International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, Washington, DC, 1998. 225

J. E. Tilton : Colorado School of Mines. 226

J. Tirole : *Théorie de l'organisation industrielle*. Economica, Paris, 1993. 66, 74

J. Tuominen et I. V. Kojo : Blister flash smelting - efficient and flexible low-cost continuous copper process. *In Converter and Fire Refining Practices*, p. 271–282. The Minerals, Metals & Material Society, Warrendale, PA, 2005. 51, 131, 179

UMICORE : Risk Assessment of Zinc and its compounds. Rap. tech., 2015. 225

UNCTAD : Les différentes étapes de la production de zinc. Rap. tech., 2013. 7

UNCTAD : Developments and New Challenges for Base Metals : The Case of Copper, Zinc, Lead and Nickel. Rap. tech., 2014. 12, 225

USGS : 2014 Mineral Commodity Summary : zinc. Rap. tech., U.S. Department of the Interior, 2014. 34, 35, 224, 270, 271

W. F. Velicer et J. L. Fava : Effects of Variable and Subject Sampling on Factor Pattern Recovery. *Psychological Methods*, 3(2):231–251, 1998. 193

P. K. Verleger : The determinants of official OPEC crude prices. *The Review of Economics and Statistics*, 64(2):177–183, 1982. 120

L. von Mises : *Human action. A Treatise on Economics*. Yale University Press, New Haven, 1949. 109

J. von Neumann et O. Morgenstern : *Theory of Games and Economic Behavior*. 1944. 29

L. Walras : *Éléments d'économie politique pure ou Théorie de la richesse sociale*. L.Corbaz et Cie, Paris, Lausanne, 1874. 105

C. Watkins et M. Mcaleer : Econometric modelling of non-ferrous metal prices. *Journal of Economic Surveys*, 18(5):651–702, 2004. 120

J. C. Williams et B. D. Wright : *Storage and Commodity Markets*. Cambridge University Press, New York, 1991. 110

O. E. Williamson : *The Economic Institutions of Capitalism : Firms, Markets and Relational contracting*. The Free Press, a Division of Macmillan Inc., New York, 1985. 75, 108

O. E. Williamson : Public and Private Bureaucracies : A Transaction Cost Economic Perspective. *Journal of Law, Economics and Organization*, 15(1):306–342, 1999. 75, 96, 108

Wood Mackenzie - Brook Hunt : TC database, 2012. 154

O. Woodward : *A Review of the Broken Hill Lead-Zinc-Silver Industry*. West Pub. Corp., Australasian ed., Parkville, 1965. 31, 101

H. Working : Price Relations between July and September Wheat Futures at Chicago since 1885. Rap. tech., Wheat Studies of the Food Research Institute. 9(6), 1933. 82, 108

WTO. General Agreement on Tariffs and Trade : Problems of Trade in Certain Natural Resource Products. Background Study on Zinc and Zinc Products. 1984. 184

WTO. General Agreement on Tariffs and Trade : Problems of Trade in Certain Natural Resource Products. Background Study on Zinc and Zinc Products. 1985. 184

T. Yamane : *Statistics, An Introductory Analysis*. Harper and Row, New York, 2 édn, 1967. 193

X. Zhang, L. Yang, H. Li, W. Wang et B. Ye : Impact of lead/zinc mining and smelting on the environment and human health in China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(4):2261–2273, 2012. 225

Y. Zhang : BHP Settles Coking Coal Price on a Quarterly Basis. *Dow Jones News*, p. 1–3, 30 juillet 2010. 221

Annexe A

Elements chiffrés sur la filière du zinc

Tableau A.1: Production minière du concentré de zinc par pays

Pays	2009	2010	2011	2012	2013
Argentine	31 869	32 566	33 975	42 000	40 000
Arménie	6 989	14 361	15 588	10 075	11 500
Australie	1 290 000	1 479 000	1 515 000	1 514 000	1 523 000
Bolivie	430 879	411 409	427 129	405 000	407 332
Bosnie et Herzégovine	3 400	5 500	6 900	7 000	7 000
Brésil	172 688	211 203	197 840	198 000	152 414
Bulgarie	9 339	9 904	10 977	12 116	12 100
Myanmar	6 000	7 000	7 000	7 000	32 215
Canada	699 145	649 065	622 600	641 260	10 000
Chili	27 801	27 662	36 602	26 762	426 089
Chine	3 330 000	3 700 000	4 050 000	4 900 000	29 759
République démocratique du Congo	19 636	9 223	14 758	10 572	5 000 000
Finlande	30 233	55 562	64 115	51 467	12 114
Géorgie	–	–	–	–	38 930
Grèce	18 126	19 976	20 000	20 000	21 000
Guatemala	–	–	–	–	1 221
Honduras	36 370	33 839	26 000	26 000	25 000
Inde	695 000	740 000	796 000	758 000	793 000
Iran	72 048	80 000	80 000	80 000	130 000
Irlande	385 670	342 434	344 000	337 500	326 700
Kazakhstan	387 400	398 400	405 300	370 500	361 500
Corée du Nord	70 000	70 000	70 000	70 000	36 000
Corée du Sud	2 221	355	743	750	1 750
Kosovo	5 332	8 678	6 597	6 607	7 100
Laos	3 400	5 000	4 320	4 500	2 750
Macedonie	29 000	29 000	28 000	28 000	29 000
Mexique	489 766	570 004	631 859	660 349	642 542
Mongolie	78 800	56 300	52 300	59 600	52 050
Maroc	48 600	61 900	60 000	58 000	46 000
Namibie	197 400	204 229	192 173	194 380	184 109
Nigéria	2 000	8 000	3 000	15 000	10 000
Pakistan	1 000	10 000	15 000	12 000	10 024
Pérou	1 512 931	1 470 450	1 256 383	1 280 975	1 351 273
Philippines	10 035	9 268	18 170	19 559	16 730
Pologne	115 500	92 000	60 000	60 000	77 000
Portugal	501	6 421	4 227	30 006	53 382
Russie	225 000	269 000	275 000	288 000	191 000
Arabie Saoudite	4 952	4 897	5 000	15 000	20 000
Serbie	1 000	1 000	1 000	1 000	0
Afrique du Sud	28 159	36 142	36 629	37 000	30 145
Espagne	1 200	17 318	33 200	33 200	29 000
Suède	192 538	198 686	194 429	188 000	176 366
Tadjikistan	–	–	8 000	18 000	20 000
Thaïlande	34 000	25 529	18 252	31 000	30 000
Turquie	136 000	196 000	160 000	206 000	200 000
Etats Unis	736 000	748 000	769 000	738 000	784 000
Ouzbékistan	–	–	15 000	25 000	35 000
Vietnam	38 000	36 000	38 000	38 000	20 000
Total	11 600 000	12 400 000	12 600 000	13 500 000	13 400 000

Source : USGS (2014)

En tonnes métriques du contenu métallique du concentré du zinc et du minerai transporté sans concentration

Tableau A.2: Transformation du concentré de zinc par pays

Pays	Spécialisation	2009	2010	2011	2012	2013
Algérie		30 000	30 000	30 000	30 000	30 000
Argentine						
	Primaire	32 989	39 540	40 381	35 000	36 712
	Secondaire	2 639	3 163	3 230	2 600	2 640
	Total	35 628	42 703	43 611	37 600	39 400
Australie						
	Primaire	525 000	499 000	507 000	498 000	498 000
	Secondaire	6 000	6 000	6 000	6 000	6 200
	Total	531 000	505 000	513 000	504 000	504 000
Belgique	primaire	14 000	260 000	282 000	250 000	252 000
Brésil	primaire	242 136	288 107	284 770	285 000	242 000
Bulgarie	primaire et secondaire	92 676	88 253	93 000	93 000	75 830
Canada,	primaire	685 504	691 221	662 151	648 614	651 634
Chine	primaire et secondaire	4 280 000	5 160 000	5 210 000	4 830 000	5 300 000
Finlande	primaire	295 049	307 144	307 352	314 742	311 686
France	primaire	161 000	163 000	164 000	161 000	152 000
Allemagne	primaire et secondaire	153 000	165 000	170 000	169 000	162 000
Inde,	primaire et secondaire	614 000	700 000	795 000	800 000	760 000
Iran		115 000	120 000	132 000	148 000	140 000
Italie	primaire	100 000	105 000	100 000	100 000	110 000
Japon	primaire et secondaire	540 604	574 008	544 674	571 312	587 291
Kazakhstan	primaire et secondaire	327 873	318 858	319 752	319 847	320 150
Corée du Nord,	primaire et secondaire	70 000	70 000	70 000	70 000	35 000
Corée du Sud,	primaire	751 179	717 100	828 735	875 000	885 000
Mexique	primaire	385 400	328 100	322 100	322 000	322 800
Namibie	primaire	150 400	151 688	145 639	145 342	124 924
Pays Bas	primaire	224 000	254 000	261 000	257 000	257 000
Norvège	primaire	138 973	148 862	153 200	152 647	143 444
Pérou	primaire	149 494	223 112	313 714	319 280	346 362
Pologne	primaire et secondaire	139 100	135 000	156 000	150 000	154 379
Roumanie	primaire et secondaire	4 000	–	–	–	–
Russie	primaire et secondaire	225 000	260 000	267 280	270 000	230 000
Afrique du Sud,	primaire	87 000	90 000	73 000	–	–
Espagne	primaire et secondaire	500 776	505 000	489 000	490 000	521 000
Thaïlande	primaire	104 695	100 000	103 366	97 000	78 000
Etats Unis						
	Primaire	94 000	120 000	110 000	114 000	106 000
	Secondaire	109 000	129 000	138 000	147 000	127 000
	Total	203 000	249 000	248 000	261 000	233 000
Ouzbekistan	primaire	40 000	40 000	54 900	61 100	62 000
Vietnam	primaire	17 000	16 000	16 000	18 000	18 000
	Grand total	11 400 000	12 800 000	13 200 000	12 800 000	13 000 000
	Dont					
	Primaire	4 230 000	4 570 000	4 760 000	4 680 000	9 680 000
	Secondaire	170 000	170 000	170 000	170 000	276 000
	Sans distinction	7 060 000	8 100 000	8 250 000	7 910 000	3 100 000

Source : USGS (2014)

En tonnes métriques du contenu métallique du concentré du zinc et du minerai transporté sans concentration

Tableau A.3: Liste des principales mines en exploitation partagée

Mine	Pays	Propriétaires
Century	Australie	China Minmetals Corp. OZ Minerals Lts
Rampura Agucha	India	Hindustan Zinc Limited[1]
Red Dog Alaska	USA	Teck Resources Limited
Iscaycruz	Pérou	Glencore International AG
Brunswik 12	Canada	Xstrata plc
Greens Creek Alaska	USA	Hecla Mining Company Rio Tinto Group
Mount Isa	Australie	Xstrata plc
Tara Mine	Ireland	Boliden AB
Lisheen	Ireland	Anglo American plc Exxaro Resources Ltd Ivernia Inc
Antamina	Pérou	BHP Billiton Limited Mitsubishi Materials Corp. Teck Resources Ltd Xstrata plc

Source : Auteur et Smale (2014)

Hindustan Zinc Limited appartient à 64.9% à Sterlite Industries India Limited.

Tableau A.4: Composition de neuf types de concentrés mélangés pour optimiser le processus de transformation

Composant	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Zn	49.3	53.75	47.16	49.8	50.22	55.25	48.72	50.37	46.45
S (total)	30	32.2	32.85	31.75	32.3	21.35	33.5	33.5	32.5
Cu	1.96	0.55	1.52	0.22	0.53	0.98	0.3	0.3	2.06
Cd	0.29	0.09	0.36	0.28	0.26	0.42	0.49	0.49	0.23
Co	0.006	0.002	0.01	0.001	0.001	0.01	0.001	0.001	0.056
Ni	0.002	0.001	0.006	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003
Al2O3	0.17	0.14	0.35	0.17	0.5	0.28	0.08	0.05	0.38
Tl(g/t)	-	5	11	7	15	9	10	11	8
Pb	2.85	0.56	0.85	1.75	2.77	3.31	1.89	1.06	2.65
Fe	6.9	9.05	13.15	11.46	6.8	4.69	13.22	10.85	9.75
SiO2	2.25	1.7	2.2	1.85	4.55	1.9	0.62	0.95	3.3
Ge(g/t)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Sb	0.001	0.001	0.001	0.064	0.027	0.001	0.012	0.02	0.002
As	0.002	0.02	0.007	0.04	0.13	0.002	0.18	1.02	0.05
MgO	0.08	0.13	0.09	0.08	0.06	0.13	0.1	0.07	0.07
CaO	0.38	0.14	0.45	0.09	0.12	0.38	0.4	0.3	0.43
Cl	0.01	0.011	0.01	0.012	0.009	0.01	0.011	0.01	0.01
F	0.008	0.013	-	0.01	0.01	0.01	0.008	0.005	0.01

***Source :** Boyanov et al. (2011)*

Tableau A.5: Taxes minières dans une sélection de pays : exemple du cuivre

Pays	Nom de la taxe minérale	Taxe sur le cuivre, %
Argentine	Provincial mining royalties	3%
Australie	Mineral Resource Rent Tax	2,7%-3,5%
Brésil	Compensation for the Exploration of Mineral Resources	2.10%
Canada	Mining Tax	10%-16%
Chili	Specific Mining Tax	0%-14%
Chine	Mining Royalty	0,5%-4%
Congo (Rép.Dém.)	Redevance Minière	2.09%
Allemagne	N/A	N/A
Ghana	Mineral Royalties	5%
Inde	Royalty / Dead rent	4.20%
Indonésie	Government Royalty	4%
Kazakhstan	Mineral Extraction Tax	5.70%
Mexique	N/A	N/A
Pérou	Mining Tax, Royalty and Contributions	1%-13,12%
Philippines	Royalties to mineral reservations and to indigenous cultural communities	2%-5%
Russie	Mineral Resources Extraction Tax	8%
Afrique du Sud	Mining and Petroleum Resource Royalty	0,5%-7%
Royaume Uni	N/A	N/A
Etats-Unis	Federal Land Royalty and Severance Taxes	0%-5%

***Source :** PricewaterhouseCooper (2012)*

Annexe B

Compléments sur les tests de racine unitaire

Méthode de test ADF appliquée :

1. Le choix du paramètre de troncature à introduire dans le test est réalisé à l'aide de l'examen d'autocorrélation partielle des tests sur les critères d'information.
2. La réalisation de trois modèles.
3. Conclusion sur la stationnarité de la variable.
4. Conclusion sur la nature du processus.

Les hypothèses sont alors :

H_0 présence de racine unitaire

H_A absence de racine unitaire

Pour chaque modèle la statistique de test ADF z(t) est comparée en valeur absolue avec les valeurs critiques tabulées. Lorsque la valeur absolue de la statistique de test est supérieure à la valeur critique nous rejetons l'hypothèse nulle de la présence de racine unitaire. Nous comparons les trois modèles suivants :

- Modèle général avec tendance et constante
- Modèle avec constante
- Modèle sans constante ni tendance

Tableau B.1: Test de racine unitaire et identification du processus

Variable	Libellé	1. Modèle Constante et tendance	2. Modèle avec Constante	3. Modèle sans constante ni tendance	Type de processus
			z(t)		
TC de base	BTC	-3,439 (3)	-2,335 (3)	-0,008 (3)	DS I(1)
TC réalisée	TCN	-3,206 (1)	-2,37 (1)	-0,34 (1)	DS I(1)
Stock	StockKt	-1,418 (1)	-1,713 (1)	-0,991 (1)	DS I(1)
Prix du zinc	ZNP	-4,1 (1)	-2,65 (1)	-0,73 (1)	DS I(1)
TC réalisée spot	TCRJ	-3,379** (3)	-3.220** (3)	-3.311** (3)	S I(0)
Δ TC de base	DBTC	-6,864** (1)	-6,97** (1)	-7,018** (1)	S I(0)
Δ TC réalisée	DTCN	-4,78** (1)	-4,842** (1)	-4,891** (1)	S I(0)
Δ Stock	DSTOCK	-4,283***(1)	-4,253** (1)	-4,285** (1)	S I(0)
Δ Prix du zinc	DZNP	-6,449** (1)	-6,542** (1)	-6,55** (1)	S I(0)
Résidus régression LTC LZP LST	Ehat	-3.956 ***(1)	-3.971 *** (1)	-4.033*** (1)	S I(0)

Source : Auteur

** indique une valeur significative à 5%, *** indique une valeur significative à 1% selon les valeurs critiques issues de la table de McKinnon (1991). Le nombre de retards est indiqué entre parenthèses.

Tableau B.2: Choix de la structure du modèle sur la base des critères d'information

Selection-order criteria — Number of obs = 35

Sample : 1976-2013

Lag	LL	LR	df	p	FPE	AIC	HQIC	SBIC
0	-36.7448				.001945	2.27113	2.31715	2.40445
1	16.6383	106.77	9	0.000	.000154	-.265049	-.080966	.268214*
2	21.7374	10.198	9	0.335	.000196	-.04214	.280004	.891069
3	40.4884	37.502*	9	0.000	.000116*	-.599339*	-.139134*	.733816
4	46.336	11.695	9	0.231	.000148	-.419203	.179064	1.3139

Endogènes : LTC LZP LST
Exogènes : constante

Source : Auteur

Tableau B.3: Etude des relations de cointégration

Johansen test for cointegration

Trend : constant — Number of obs = 38
Sample : 1976-2013 — Lags = 1

Maximum rank	parms	LL	Eigenvalue	Trace Statistic	5% Critical value
0	3	-7.703866	.	53.6631	29.68
1	8	14.783687	0.69381	8.6880*	15.41
2	11	17.704421	0.14249	2.8465	3.76
3	12	19.127681	0.07217		

Source : Auteur

Annexe C

Maximisation du profit du mineur et du transformateur

I Maximisation du profit du transformateur

Nous formulons la recette du transformateur en tant que somme du revenu de la vente du métal et celui de la TC :

$$R_S = PZn * Q_m + TC * Q_c \tag{C.1}$$

Avec :

R_S revenu du transformateur

PZn prix du zinc

Q_m quantité du métal

Q_c quantité du concentré

Le transformateur procède à l'achat du concentré où, plus exactement, à l'achat du métal contenu dans le concentré. Nous pouvons formuler les dépenses du transformateur comme la somme des coûts d'achat du métal et des coûts de transformation (la TC fait partie du revenu du transformateur, elle n'apparaît donc pas dans les dépenses).

$$D_S = PZn * Q_m + (C_S(Q_c)) \tag{C.2}$$

Avec :

D_S dépenses du transformateur

Q_c quantité du concentré

$C_S(Q_c)$ coût total de transformation, fonction de la quantité du concentré transformé

Ainsi, le profit du transformateur est formulé comme suit :

$$\pi_S = R_S - D_S \tag{C.3}$$
$$\pi_S = (PZn * Q_m + TC * Q_c) - (PZn * Q_m + C_S(Q_c)) \tag{C.4}$$
$$\pi_S = PZn * Q_m + TC * Q_c - PZn * Q_m - C_S(Q_c) \tag{C.5}$$
$$\pi_S = TC * Q_c - C_S(Q_c) \tag{C.6}$$

En utilisant la condition du 1er ordre de la maximisation du profit

$$\text{Max}\pi_S : \frac{\partial \pi_S}{\partial Q_c} = 0 \tag{C.7}$$

On obtient $Cm_S = TC$, avec Cm_S désignant le coût marginal de transformation. La condition du 1er ordre de la maximisation du profit traduit l'égalité de la TC au coût marginal de transformation. La condition du 2nd ordre de la maximisation du profit stipule l'existence du profit marginal décroissant :

$$\text{Max}\pi_S : \frac{\partial^2 \pi_S}{\partial {Q_c}^2} \geq 0 \tag{C.8}$$

Ce qui permet d'obtenir l'expression suivante : $Cm'_S(Qc) \geq 0$

Le transformateur maximise sont profit sous condition que le coût marginal de transformation est au moins égal à la TC (recette marginale). La TC marginale est égale à la TC moyenne (identifiée comme TC dans notre travail).

A court terme le seuil de fermeture du transformateur correspond au minimum du coût variable moyen (le point de la courbe des coûts où le cout marginal est supérieur au coût variable moyen). En ce qui concerne le seuil de rentabilité, à court terme il correspond à une situation où la TC est égale minimum de coût moyen (le point de la courbe où le coût marginal de court terme est supérieur au coût moyen).

A long terme, en absence de coûts fixes, le coût moyen est égal au coût variable moyen. Le seuil de fermeture correspond à la situation où la TC est égale au coût moyen. Le seuil de rentabilité correspond à une situation où le le coût marginal de long terme doit être égal au coût moyen de long terme (lorsque le coût moyen est au minimum), avec la TC d'équilibre supérieure ou égale au coût marginal.

A court terme, la condition de libre entrée et sortie dissipe les profits économiques. A long terme, un profit résiduel durable peut exister (il correspond à une rente obtenue par la firme disposant des avantages des coûts de production par rapport aux autres firmes).

II Maximisation du profit du mineur

Le revenu du mineur provient uniquement de la la vente du métal contenu dans le concentré :

$$R_M = PZn * Q_m \tag{C.9}$$

Avec :

R_M revenu du mineur

PZn prix du zinc

Q_m quantité du métal

Le mineur intègre dans ses dépenses les coûts d'extraction et de transformation du concentré en métal (TC).

$$D_M = C_M(Q_c) - Q_c * TC \tag{C.10}$$

Avec :

D_M dépenses du mineur

Q_c quantité du concentré

$C_M(Q_c)$ coût total du mineur, fonction de la quantité du concentré extrait

Le profit d'une entreprise minière dépendra directement du prix du métal et indirectement des déductions de la TC faites au moment de la vente du concentré. Le profit est exprimé alors comme la différence entre les revenus de la vente du concentré et le coût total de la production du métal à partir du concentré.

$$\pi_M = PZn * Q_m - C_M(Q_c) - Q_c * TC \tag{C.11}$$

On introduit a, le paramètre technique de transformation $0 < a < 1$, qui formalise la relation entre la quantité du métal et la quantité du concentré :

$$Q_m = a * Q_c \tag{C.12}$$

Nous obtenons ainsi une expression du profit du mineur qui dépend uniquement de la quantité du concentré :

$$\pi_M = aPZn * Q_c - TC * Q_c - C_M(Q_c) \tag{C.13}$$

On applique la conditions du 1er du 2nd ordre de la maximisation du profit :

$$\text{Max}\pi_M : \frac{\partial \pi_M}{\partial Q_c} = 0 \tag{C.14}$$

$$\text{Max}\pi_M : \frac{\partial^2 \pi_M}{\partial {Q_c}^2} \geq 0 \tag{C.15}$$

Ce qui nous permet d'obtenir l'expression du coût marginal du mineur :

$$Cm_M = aPZn - TC \tag{C.16}$$

Le coût marginal du mineur doit être égal à la différence entre le prix du métal pondéré par la part en métal du concentré (soit par la part du métal contenu dans le concentré) et la TC. Le coût marginal du mineur inclut le coût marginal d'extraction et celui de transformation.

Annexe D

Résolution du système d'équations de l'équilibre partiel

I Résolution du système d'équations de l'équilibre partiel

Nous définissons un système d'équation composé de sept équations avec sept inconnues régissant les équilibres simultanés sur le marché du métal et sur le marché du concentré. Ces équations expriment l'offre et la demande sur les deux marchés, les conditions d'équilibre (égalité de l'offre et de la demande) ainsi que le lien entre la quantité du concentré et du métal. L'expression du prix résiduel, défini en tant que fonction du prix du métal, de la TC et du contenu métallique, permet d'introduire le lien en termes du prix entre le marché du métal et le marché du concentré :

$$P_r = aPZn - TC \tag{D.1}$$

Avec P_r le prix résiduel, TC la TC appliquée tenant compte des coefficients de variation PZn prix du métal et a le paramètre technique de transformation $(0 < a < 1)$.

On définit les fonctions d'offre et de demande en tant que fonction linéaires simples du prix :

$$S_C = gP_r + v \tag{D.2}$$

Avec g l'élasticité prix de l'offre de concentré et v – le vecteur des variables économiques affectant l'offre de concentré, $g, v > 0$. L'offre de concentré est fonction croissante du prix résiduel.

$$D_C = bTC + k \tag{D.3}$$

Avec b l'élasticité de la demande de concentré en réponse à la TC et k le vecteur des variables économiques affectant la demande de concentré, $b, k > 0$. La demande de concentré est fonction croissante de la TC. L'offre de métal dépend de la demande du concentré et du contenu métallique de celui-ci :

$$S_M = aD_C \tag{D.4}$$

La demande de métal est modélisée en tant que fonction linéaire du prix du métal, fonction décroissante du prix

$$D_M = -ePZn + n \tag{D.5}$$

Avec e l'élasticité de la demande du prix du métal, n le vecteur des variables économiques affectant la demande de métal, $e, n > 0$. La demande de métal est fonction décroissante du prix du métal.

Les conditions de l'équilibre simultané sur le marché du concentré et sur le marché du métal s'écrivent ainsi :

$$S_C = D_C \tag{D.6}$$
$$S_M = D_M \tag{D.7}$$

Notre système d'équation est composé de sept équations avec sept inconnues : S_C, D_C, S_M, D_M, P_C, PZn, TC.

Nous procédons à la résolution de ce système d'équations afin d'obtenir l'expression de la TC uniquement à l'aide des paramètres du modèle (g, v, b, k, a, e, n). Pour le faire, d'abord on exprime Pr à partir de l'équation de l'équilibre sur le marché du concentré :

$$S_C = D_C \tag{D.8}$$
$$gP_r + v = bTC + k \tag{D.9}$$
$$P_r = b\frac{TC}{g} + \frac{k}{g} - \frac{v}{g} \tag{D.10}$$

On utilise l'expression de l'équilibre sur le marché du métal D.7 pour obtenir l'expression de PZn :

$$aD_C = -ePZn + n \tag{D.11}$$

On substitue D.3 dans D.11 :

$$abTC + ak = -ePZn + n \tag{D.12}$$
$$-ePZn = abTC + ak - n \tag{D.13}$$
$$PZn = -ab\frac{TC}{e} - a\frac{k}{e} + \frac{n}{e} \tag{D.14}$$

On exprime PZn à partir de l'équation D.1 :

$$PZn = \frac{P_r}{a} + \frac{TC}{a} \tag{D.15}$$

Qu'on complète par l'expression de PZn issue de l'équation D.14 :

$$\frac{P_r}{a} = \frac{abTC}{e} - \frac{ak}{e} + \frac{n}{e} - \frac{TC}{a} \tag{D.16}$$

$$P_r = -\frac{a^2bTC}{e} - \frac{a^2k}{e} + \frac{an}{e} - TC \tag{D.17}$$
$$P_r = TC(-\frac{a^2b}{e} - 1) - \frac{a^2k}{e} + \frac{an}{e} \tag{D.18}$$

On égalise les deux expressions de P_r :

$$b\frac{TC}{g}+\frac{k}{g}-\frac{v}{g}=TC(-\frac{a^2b}{e}-1)-\frac{a^2k}{e}+\frac{an}{e} \tag{D.19}$$

$$TC(-\frac{a^2b}{e}-1-\frac{b}{g}=\frac{k}{g}-\frac{v}{g}+\frac{a^2k}{e}--\frac{an}{e} \tag{D.20}$$

$$-TC(\frac{a^2bg+eg+eb}{eg})=\frac{ek-ve+a^2gk-agn}{eg} \tag{D.21}$$

$$TC(\frac{a^2bg+eg+eb}{eg})=\frac{-ek+ve-a^2gk+agn}{eg} \tag{D.22}$$

$$TC=\frac{a^2gk+agn-ek+ev}{a^2bg+eb+eg} \tag{D.23}$$

II Calcul des fonctions dérivées partielles de la TC

Nous utilisons la formule de la TC obtenue lors de la résolution de l'équilibre simultané sur le marché du métal et du concentré (équation D.23) pour procéder au calcul des dérivées partielles de la TC. Ce calcul est réalisé à l'aide du logiciel Mathematika.

Nous procédons au calcul de la fonction dérivée de la TC par rapport à l'élasticité de la demande du prix du métal e :

$$\frac{\partial TC}{\partial e}=\frac{ba^2g^3n^2+ka^2g^2+bva^2g}{(bga^2+be+eg)^2} \tag{D.24}$$

$$\frac{\partial TC}{\partial e}=\frac{a^2g(bg^2n^2+kg+bv)}{(bga^2+be+eg)^2} \tag{D.25}$$

Le dénominateur est toujours supérieur à zéro ($D>0$), c'est donc l'étude du numérateur N qui va nous indiquer le signe de la dérivée partielle. Le numérateur de l'équation D.25 est toujours positif ($N>0$) on en conclue que :

$$\frac{\partial TC}{\partial e}>0 \tag{D.26}$$

Ensuite nous identifions le signe de la dérivée de la TC par rapport au vecteur des variables économiques affectant la demande de concentré, k. Ce signe est négatif :

$$\frac{\partial TC}{\partial k}=-\frac{ga^2+e}{bga^2+be+eg} \tag{D.27}$$

$$\frac{\partial TC}{\partial k}<0 \tag{D.28}$$

L'étude du signe de la dérivée de la TC par rapport au coefficient de transformation technique a est détaillé ci-dessous :

$$\frac{\partial TC}{\partial a} = \frac{(-bg^2n)a^2 + (g(2egk + 2bev))a + g(ben + egn)}{(bga^2 + be + eg)^2} \tag{D.29}$$

Le dénominateur de l'équation D.29 est toujours positif, on va donc étudier le signe du numérateur. C'est un polynôme de a dont le signe dépend des valeurs prises par a. Nous allons décrire les paramètres de ce polynôme afin d'en identifier la représentation graphique. Le coefficient du terme a^2 est inférieur à 0, donc les branches de la parabole sont dirigées vers le bas et elles croisent l'axe des abscisses en deux points correspondant aux racines du polynôme. Nous étudions le signe du discriminant de ce polynôme afin de connaître le nombre de points de croisement de l'axe des abscisses. Le calcul du discriminant est issu de la formule générale D.30 :

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \tag{D.30}$$

Si le discriminant est nul, l'équation D.30 admet une seule racine calculée (la parabole croise l'axe des abscisses en un seul point) qu'on calcule comme :

$$x = \frac{-b}{2a} \tag{D.31}$$

Le discriminant du polynôme du numérateur de l'équation D.29 est supérieur à 0 ($b^2 > 0$, et $(-4ac) > 0$ car $4ac < 0$), ce qui veut dire que ce polynome a deux racines exprimées comme :

$$a_{1,2} = \frac{\pm\varphi_1 + egk + bev}{bgn} \tag{D.32}$$

avec

$$\varphi_1 = \sqrt{b^2e^2v^2 + b^2egn^2 + 2be^2gkv + beg^2n^2 + e^2g^2k^2} \tag{D.33}$$

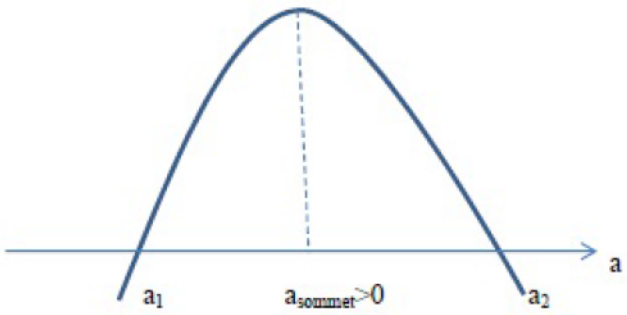
Le sommet du polynôme est calculé de manière suivante :

$$-\frac{b}{2a} = \frac{ekg + evb}{bng} \tag{D.34}$$

C'est une valeur positive qui peut être représenté schématiquement. Les valeurs de la dérivée qui se situent à droite du sommet correspondent à $\frac{\partial TC}{\partial a} < 0$; les valeurs de la dérivée qui se situent à gauche du sommet sont décrites à l'aide de l'expression $\frac{\partial TC}{\partial a} > 0$. Sachant que a se situe dans l'intervalle entre 0 et 1, $a \exists [0; \quad 1]$, nous pouvons émettre conclure sur le signe de la dérivée de la TC en fonction des valeurs prises par les racines $a_{1,2}$ du polynome (Figure D.1).

La position de 0 par rapport à a_1 et a n'est pas identifiée ($a_1 < 0 < a$ ou $0 < a_1$). La position de 1 par rapport à a n'est pas identifiée non plus et dépendra de la position de 0 (à droite de zéro). Nous avons au total 7 position possibles de 0 et 1 par rapport à a_1, a et a_2 dont 3 solutions avec $\frac{\partial TC}{\partial a} > 0$et 4 solutions où $\frac{\partial TC}{\partial a}$ change de signe en fonction des valeurs de a, passant de > 0 à < 0. A ce stade, on peut conclure que le signe de la dérivée partielle est soit

Graphique D.1: Schéma du polynome



Source : Auteur

positif soit variable, passant du positif au négatif.

Nous poursuivons notre étude parle calcul de la fonction dérivée de la TC par rapport à l'élasticité prix de l'offre de concentré g :

$$\frac{\partial TC}{\partial g} = \frac{e^2k - e^2v - a^2bev + aben}{(bga^2 + be + eg)^2} \tag{D.35}$$

Le dénominateur de l'expression D.35 est toujours supérieur à 0, on va donc étudier le signe du numérateur. Le signe de la dérivée va dépendre du rapport entre plusieurs variables du modèle et il sera déterminé par la différence entre les membres de l'équation au signe positif et ceux au signe négatif :

$$ke^2 + abne \tag{D.36}$$

et :

$$-bva^2e - ve^2 \tag{D.37}$$

ce qui équivaut à déterminer le signe de l'expression suivante :

$$e^2(k - v) + abe(n - av) \tag{D.38}$$

Nous ne pouvons pas nous prononcer sur le signe de cette expression sans poser d'hypothèses supplémentaires sur le rapport entre les variables concernées : k vs v et n vs av. A ce stade, il nous est donc impossible de conclure la nature de la relation de la TC et de g.

Nous passons ensuite à l'étude de la dérivée de la TC par rapport au vecteur des variables économiques affectant la demande de métal n.

$$\frac{\partial TC}{\partial n} = \frac{ag}{bga^2 + be + eg} \tag{D.39}$$

Le signe de cette expression est positif, donc :

$$\frac{\partial TC}{\partial n} > 0 \tag{D.40}$$

La dérivée de la TC par rapport à l'élasticité de la demande de concentré, b, est exprimée par l'équation D.41 :

$$\frac{\partial TC}{\partial b} = \frac{e^2k - e^2v + a^4g^2k - a^3g^2n + 2a^2egk - a^2egv - aegn}{(bga^2 + be + eg)^2} \tag{D.41}$$

Le dénominateur de l'équation D.41 est supérieur à 0, on cherche donc à connaître le signe du numérateur. Nous ne pouvons pas en identifier le signe sans poser d'hypothèses sur la valeur des paramètres. Nous concluons donc qu'à ce stade il nous est impossible de nous prononcer sur le signe de cette dérivée partielle sans poser d'hypothèses supplémentaires sur la valeur des paramètres suivants : k vs v et ak vs n.

Enfin, nous calculons la dérivée de la TC par rapport au vecteur des variables économiques affectant l'offre de concentré, v :

$$\frac{\partial TC}{\partial v} = \frac{e}{bga^2 + be + eg} \tag{D.42}$$

Le signe de cette expression est positif, donc $\frac{\partial TC}{\partial v} > 0$.

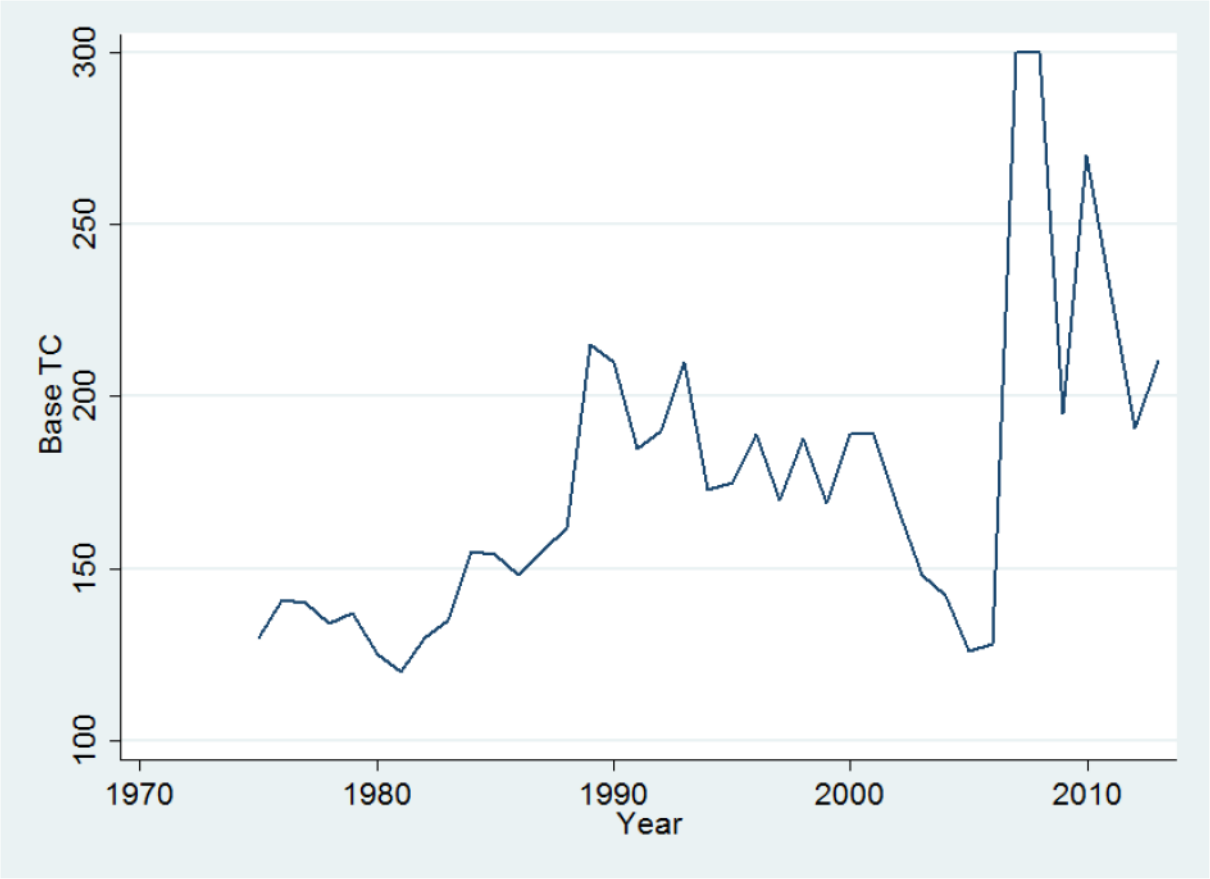
Annexe E

Procédure de Box et Jenkins appliquée aux séries de la TC

Box et Jenkins (1970) proposent une méthodologie pour l'étude des séries temporelles qu'on qualifie d'a-théorique compte tenu de la modélisation d'une série temporelle uniquement en fonction de ses valeurs passées et des valeurs passées et présentes du terme d'erreur (Mignon, 2008). Cette méthodologie permet d'identifier le type de processus qui caractérise une série soumise aux chocs aléatoires sur la période d'observation. Les modèles ARIMA (Autoregressive Moving Average) sont une forme générale des modèles combinant les processus autorégressifs, les processus intégrés et les moyennes mobiles. Nous appliquons cette méthodologie pour modéliser les processus de la TC de base et de la TC spot.

La modélisation se fait en quatre étapes : l'identification, l'estimation, la validation et la prévision. La première étape consiste à trouver les valeurs p, q et i du processus. On procède à l'étude de la stationnarité des séries, ensuite on utilise les fonctions d'autocorrélation et d'autocorrélation partielle pour identifier les valeurs q et p respectivement. La seconde étape est l'estimation des paramètres du modèle. On valide le modèle dans le cadre de la troisième étape. Si plusieurs modèles permettent d'obtenir des résultats satisfaisants et possèdent des

Graphique E.1: TC de base annuelle (1975-2014)



Source : Auteur

résidus de normaux, homoscédastiques et non autocorrélés, le choix du modèle se fait sur la base des critères standard (minimisation de l'erreur de prévision) ou ceux d'information. La quatrième étape est la prévision du processus estimé.

L'objectif de notre travail consiste uniquement en identification du processus des séries pour pouvoir le comparer avec les processus de prix existants. Ainsi, nous ne procédons pas à la prévision des séries, seules les trois premières étapes de la modélisation sont réalisées en aboutissant à l'identification des paramètres du processus de la série.

Nous procédons d'abord à l'étude de la série de la TC de base (Graphique E.1). Nous disposons des données annuelles sur la période de 1975 à 2014. Comme nous l'avons montré précédemment (chapitre 1), cette série n'est pas stationnaire, il s'agit d'une série I(1) qui peut donc être modélisée par un processus de type ARIMA.

1. Identification

Nous avons déjà réalisé le test de Dickey-Fuller Augmenté (ADF) dans le cadre de la modélisation proposée dans le chapitre 1 concluant que la série TC de base est un processus intégré d'ordre 1, stationnaire en différences premières.

Nous réalisons l'étude graphique de la fonction d'autocorrélation et d'autocorrélation partielle de la série TC de base. L'examen graphique fait ressortir l'importance de la première autocorrélation qui sort de l'intervalle de confiance. A partir de l'ordre 2, les autocorrélations diminuent et s'annulent. Nous en déduisons que le paramètre q peut prendre les valeurs de 1, 2 ou 3. La représentation graphique de l'autocorrélation partielle permet d'identifier un dépassement léger de l'intervalle de confiance pour la première observation, néanmoins cette valeur est assez faible. Le paramètre p peut ainsi prendre les valeurs de 0 ou de 1. Nous concluons que la série de la TC de base est un processus intégré d'ordre 1 qui contient un processus autorégressif. L'existence du processus de moyenne mobile est incertaine, elle est à confirmer à l'étape de l'estimation du modèle.

2. Estimation

Nous procédons à l'estimation de plusieurs modèles selon les paramètres p, q et i identifiés lors de l'étape précédente. A l'issue des estimations nous retenons le modèle ARIMA (2, 1, 0). Le modèle ARIMA (1, 1, 0) correspond au second choix d'estimation, mais il n'est pas satisfaisant en raison de l'absence des coefficients significatifs. Selon nous, la prise en compte du processus autorégressif à deux retards correspond à la réalité empirique d'un long processus d'ajustement qui caractérise l'industrie de zinc.

Le processus de type ARIMA (2,1,0) sans constante[1] (Table E.1) peut être formulé comme suit :

[1] $y_t = y_{t-1} + a_1(y_{t-1} - y_{t-2}) + a_2(y_{t-2} - y_{t-3}) + \epsilon_t$ avec a_1 et a_2 les coefficients associés aux termes autorégressifs du modèle.

Tableau E.1: Estimation du modèle ARIMA (2, 1, 0)

ARIMA regression						Number of obs = 38	
Sample : 1976-2013						Wald chi2(2) = 10.90	
Log likelihood = -189.103						Prob>chi2 = 0.0043	
D.BaseTC		Coef.	Std.Err	z	P>I z I	[95\% Conf. Interval]	
BaseTC							
constant		2.120611	5.370743	0.39	6.693	-8.405851	12.64707
ARMA							
	ar						
	L1.	-.2613195*	.1361089	-1.92	0.055	-.528088	.0054489
	L2.	-.4108505***	.1304178	-3.15	0.002	-.6664646	-.1552364
	σ	34.88772	2.506301	13.92	0.000	29.97546	39.79998

Source : Auteur

* indique une valeur significative à 10%, ** indique une valeur significative à 5%, *** indique une valeur significative à 1%

$$DTC_t = -0.26DTC_{t-1} - 0.41DTC_{t-2} + \epsilon_t \tag{E.1}$$

3. Validation

Les coefficients autorégressif d'ordre 1 et 2 sont significativement différents de 0, leurs t de Student sont supérieurs à la valeur critique au seuil statistique de 10% et 5% respectivement[2], la constante n'est pas significative. Nous procédons ensuite aux tests sur les résidus. L'absence de corrélation des résidus est confirmée (test de Portmanteau), en revanche nous ne pouvons pas affirmer la normalité des résidus sur la base de l'analyse graphique de l'histogramme de la distribution des résidus. Nous acceptons ce résultat, car nous ne souhaitons pas procéder à la prévision du processus de la TC de base. Bien conscients des limites de notre analyse, nous nous contentons de ce résultat, car le faible nombre d'observations ne nous permet pas de fournir une modélisation plus robuste.

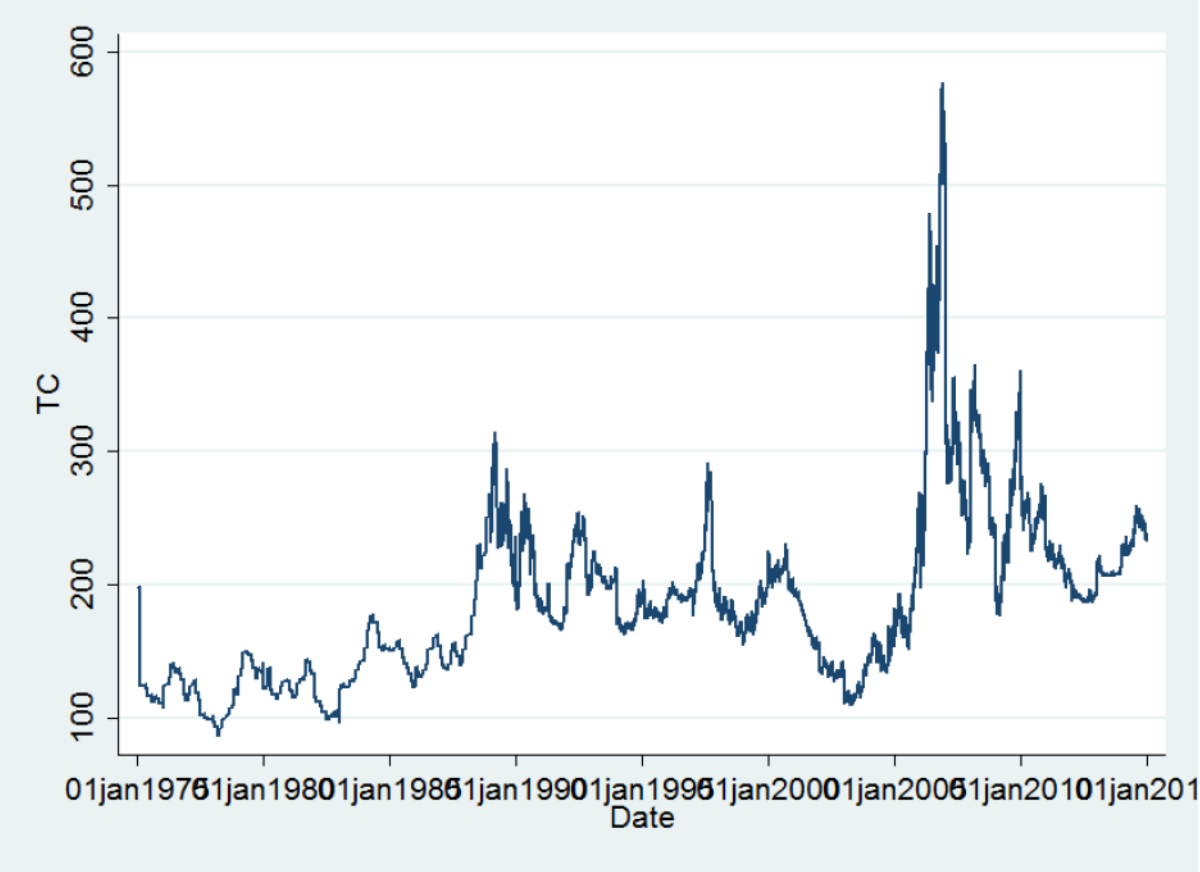
Ensuite nous utilisons la même méthodologie pour l'étude empirique de la série TC spot. Nous construisons la série sur la base des valeurs de la TC annuelle Euromin (2014) complétée par l'auteur et celles du prix du zinc journalier issues de DATASTREAM (2015). Les données couvrent une période du 01 janvier 1988 au 31 décembre 2014. Nous construisons la variable TC spot sur la base du calcul utilisé lors de la valorisation du concentré en appliquant les coefficients de variation de la TC (Chapitre 1 Section II.1, encadré 1.3, formule 1.3). A l'issue de ce calcul nous obtenons la série journalière de la TC spot (graphique E.2).

1. Identification

D'abord nous procédons à l'étude de la stationnarité de la série en utilisant la procédure du test ADF. Nous concluons la stationnarité de la série, elle peut donc être modélisée par un processus ARMA. Nous estimons les paramètres p et q à l'aide des graphiques d'autocorrélations et autocorrélations partielles de la série. La première autocorrélation sort de l'intervalle

[2]En raison d'un faible nombre d'observations nous acceptons la significativité du coefficient a_1 au seuil de 10%.

Graphique E.2: TC spot (01/01/1988-31/12/2014)



Source : Auteur

de confiance étant significativement différente de zéro. Les valeurs suivante sont diminuent progressivement, ce qui correspond à une représentation graphique des autocorrélations d'un processus AR(1). On en déduit la valeur du paramètre $q = 1$. L'étude des autocorrélations partielles permet d'identifier une première observation sortant de l'intervalle de confiance, les autocorrélations partielles suivantes s'annulent. Nous pourrions tester alors les valeurs du paramètre p égales à 0 et 1.

2. Estimation

Nous estimons le modèle ARMA et nous identifions le modèle ARIMA (1,0,0) ou ARMA (1,0) comme étant le plus adapté pour caractériser la TC spot journalière (Table E.2).

Tableau E.2: Estimation du modèle ARMA (1,0)

ARIMA regression						Number of obs = 6805	
Sample : 01dec1988-31dec2014						Wald chi2(1) = 2.69e+06	
Log likelihood = -20456.08						Prob>chi2 = 0.0000	
tc		Coef.	Std.Err	z	P>|z|	[95\% Conf. Interval]	
tc							
	constant	214.822***	24.51835	8.76	0.000	166.7669	262.8771
ARMA							
	ar						
	L1.	.9966759***	.0006075	1640.71	0.000	.9954853	.9978665
	σ	4.887739	.0052686	927.71	0.000	4.877413	4.898065

Source : Auteur

* indique une valeur significative à 10%, ** indique une valeur significative à 5%, *** indique une valeur significative à 1%

Ce processus peut être exprimé ainsi[3] :

$$TCSpot_t = 0,99TCSpot_{t-1} + 214,82 + \epsilon_t \tag{E.2}$$

Ces résultats sont à mettre en parallèle avec les études sur le processus à l'origine du processus du prix du zinc, identifié comme ARMA(1,0) ou ARMA (3,0) dans la littérature (voir Dooley et Lenihan (2005), Fabozzi *et al.* (2008), Ahti (2009), Kriechbaumer *et al.* (2014)).

3. Validation

Le coefficient autorégressif est significatif au seuil critique de 5%. Les autres étapes de validation sont similaires à celles réalisées sur la série de la TC de base.

[3] $y_t = a_1 y_{t-1} + \epsilon_t$ avec a_1 le coefficient associé aux terme autorégressif du modèle.

Annexe F

Etude du questionnaire

I Présentation du questionnaire

Cette annexe détaille la composition du questionnaire soumis aux firmes de la filière du zinc. Plusieurs types de questions sont combinées dans ce questionnaire. Nous utilisons principalement les questions qualitatives dichotomiques pour connaître le sentiment ou bien la position des firmes par rapport à un phénomène donné. Les questions qualitatives multichotomiques permettent aux participants de faire un choix parmi plusieurs propositions (questions nominales). Ces questions sont proposées lorsqu'on souhaite mieux identifier les phénomènes sur lesquels il n'existe pas de consensus dans les études précédentes.

Les questions qualitatives ordinales visent à proposer une échelle de mesure (principalement de 1 à 5) afin d'évaluer l'ordre des choix des participants. Un certain nombre de questions ouvertes est également introduit dans le questionnaire dans l'objectif de mieux comprendre les raisons des choix liés aux questions précédentes ou bien afin d'obtenir les informations complémentaires approfondissant notre étude.

Ci-dessous nous détaillons le contenu de chaque partie du questionnaire en fonction des objectifs qui y sont associés.

1. Déterminer si la TC est une variable d'intérêt pour les firmes

Cette partie contient trois questions visant à identifier l'attitude des répondants vis-à-vis de la TC. La première question porte sur les sources d'information sur la TC : elle propose le choix entre les informations prises directement lors des négociations, celles fournies par les partenaires commerciaux, les études et rapports, les revues payantes et la presse gratuite. Les répondants ont la possibilité de classer les sources d'information dans l'ordre de leur importance (de 1 à 5, 1 étant la source d'information la moins importante). Cette question vise à comprendre comment est structurée la recherche de l'information sur la TC et, par conséquent, quelle est la part des répondants obtenant les informations sur la TC directement lors des négociations face à ceux qui utilisent la TC sans forcément participer aux négociations annuelles (acceptation du niveau négocié par le marché).

La seconde question vise à identifier la perception de la TC par les répondants, en particulier de son niveau. Les répondants situent le niveau de la TC sur l'échelle de 1 à 10, 1 étant le niveau très bas). Nous souhaitons identifier s'il existe des différences de perception de la TC en fonction du type des firmes ou bien de leur localisation. La distribution des réponses permettrait de conclure de l'existence ou non du consensus quant au niveau de la TC.

La troisième question vise à identifier les variables explicatives de la TC à travers les réponses des firmes. Nous proposons cinq types de variables : l'offre et la demande du concentré, le stock du concentré, le coût de la transformation, le pouvoir du marché de certaines firmes et le prix du métal. Les répondants classent les réponses sur une échelle de 1 à 5, 5 étant un facteur

très important. L'objectif de cette question est d'identifier quelles variables sont surveillées par les intervenants en tant que guides de la variation de la TC. Le poids associé à la variable du pouvoir du marché traduit le sentiment des répondants quant à des manipulations du marché et à la possibilité d'influencer sur le niveau de la TC.

2. Étudier les réactions des firmes face aux changements de la TC

Cette partie du questionnaire vise à tester des hypothèses du modèle théorique concernant les ajustements faits par les firmes lors des variations de la TC. Trois questions composent cette partie.

La première question évoque le lien entre les variations de la TC et le revenu de la firme. On cherche à savoir si le profit des répondants dépend fortement ou faiblement du niveau de la TC. Nous nous attendons à ce que les firmes pour lesquelles la TC est un élément de profit important adoptent un comportement plus réactif face aux changements de la TC évoqués dans les questions suivantes.

La deuxième question concerne les réactions des répondants dans le cas du changement du niveau de la TC. Nous avons considéré que théoriquement, les firmes ont plusieurs possibilités allant de la production à perte jusqu'à la fermeture partielle des lignes de production. Notre objectif est de déterminer si les firmes vont réellement utiliser ce type de réactions ou bien ils utilisent ces déclarations comme les menaces rendant l'offre et la demande du concentré inélastique. Cette question cherche également à identifier la réaction des firmes à une TC favorable/défavorable (une hausse de la TC est défavorable aux mineurs et favorable aux transformateurs).

L'ajustement en réponse à une modification de la quantité d'équilibre (surplus du concentré) est étudié à l'aide de la troisième question. Jusqu'à présent nous avons supposé que toutes les firmes ajustent leur output en fonction des conditions du marché. La question vise à identifier la réaction des transformateurs. La comparaison des réponses de différents types de firmes permettrait d'identifier d'éventuelles incohérences (ou leur absence) dans l'anticipation des réactions des transformateurs.

3.Déterminer l'attitude des firmes vis-à-vis des négociations de la TC

Deux questions sont proposées dans cette partie : la première visant à identifier la stratégie de négociation de la TC et la seconde ayant pour objectif d'identifier la réaction firmes dans le cas de la TC défavorable (cas des transformateurs). Trois stratégies de négociation sont proposées dans la première question : négociation systématique, négociation pour les contrats importants, négociation lorsque la TC est élevée, l'absence de négociation est également une des réponses possibles. Les réponses à cette questions seront mises en perspective avec celles sur la manière comment la TC affecte le profit des répondants. Nous cherchons à identifier si les firmes qui considèrent que la TC affecte sensiblement leurs profits ont un comportement de négociation plus actif.

La seconde question vise à mettre en lumière les différences entre le comportement du transformateur et les anticipations de ce comportement par les mineurs en situation où la

TC est inférieure au coût de la transformation. Les choix proposés comprennent l'adoption de la politique de la réduction des coûts, l'augmentation du volume du concentré transformé (économies d'échelle), la réduction du volume du concentré transformé ou bien l'adoption d'une politique de hedging plus activé. Une échelle de 1 à 4 est proposée pour évaluer ces options, 4 étant la meilleure option disponible. Les réponses à cette question permettront non seulement d'identifier les différences entre les réactions des transformateurs et les anticipation de celles-ci par les mineurs, mais également de se prononcer sur les outils qui semblent être les plus adaptés aux répondants.

4. Evaluer la gestion de risque lié à TC

Cette partie contient quatre questions. La première question vise à identifier l'importance de la TC dans la valorisation du concentré métallique sur l'échelle de 1 à 10, 10 étant "très importante". La deuxième question effectue une comparaison entre la TC et le prix du métal en termes d'importance proposant le choix entre quatre options : la TC est plus/aussi/moins importante que le prix du métal et la TC n'a pas d'importance. Les réponses à cette question nous permettent de déterminer la position des répondants quant à la nature de la relation entre ces deux variables.

La troisième question cherche à identifier la proportion des firmes qui ont recours à la gestion active du risque de la TC (hedging). C'est une question dichotomique permettant de répondre «oui» ou «non» ainsi, elle contient également l'option «autre». Les réponses nous permettront de confirmer les résultats obtenus dans la 1ère partie du questionnaire sur l'importance de la TC dans le calcul du profit et de conclure de la cohérence des stratégies choisies. Nous cherchons à identifier la proportion des firmes qui considèrent la TC comme un élément important, mais ne pratiquent pas la gestion active des risques qui y sont associés. La dernière question cerne l'utilisation des coefficients de variation en tant qu'outils de hedging contre les variations de la TC.

5.Identifier les schémas de l'évolution de la TC

L'objectif de cette partie de quatre questions est d'étudier si les intervenants sur le marché utilisent d'autres procédés de valorisation du concentre que la TC et s'ils considèrent que le mécanisme de valorisation actuel devrait être modifié.

Les deux premières questions concernent la fixation de la TC et la fréquence de ces fixations. La première question est une question dichotomique cherchant à identifier si la TC devrait être fixée librement à chaque transaction. La deuxième question concerne la fréquence des négociations. Il s'agit d'une question à choix multiples : fréquence suffisante, les négociations doivent être plus fréquentes, les négociations doivent être moins fréquentes. Les questions suivantes concernent les alternatives à la TC et la flexibilité obtenue via les coefficients de variation.

L'une des alternatives de la TC est le tolling, nous cherchons à identifier si les répondants le considèrent comme une alternative réelle à la TC. C'est une question qualitative dichotomique fermée proposant «oui» ou «non» comme réponses. Cette question est suivie par un champ de commentaire demandant d'identifier d'autres alternatives à la TC qui semblent adaptés aux conditions actuelles du marché. La dernière question cherche à explorer l'usage des coefficients

de variations afin d'obtenir un profit de court-terme. Un champs de commentaire suit cette question afin que les firmes puissent décrire leurs stratégies. Enfin, les répondants ont la possibilité de rajouter leurs suggestions et commentaires dans un champs prévu à cet effet en fin du questionnaire.

Module 1 (introductif) : Présentation de la firme

Num.	Question	Type	Réponses
1	L'actvité principale de la société	Question à choix multiples	Activité minière Activité de transformation Activité de négoce Autre
2	L'effectif de la société	Question à choix multiples	< 250 personnes entre 250 et 4 999 personnes $> 4\ 999$ personnes
3	Le pays de la localisation de la production	Question ouverte	Liste déroulante

Remarque : Les réponses vont nous permettre de définir les groupes des firmes en fonction de leur activité principale, de leur taille[1] et de la localisation géographique.

Module 2 : Importance de la TC pour les firmes

Num.	Question	Type	Réponses
5	La source de l'information sur le niveau de la TC	Question à échelle de 1 à 5 (1 : pas du tout important - 5 : très important)	Participation aux négociations Presse gratuite Presse payante Information des partenaires/concurrents Rapports et analyses des consultants et analystes indépendants
6	La perception de la TC de 2012 : 191 $/tonne	Question à échelle de 1 à 10	1 : TC très basse - 10 : TC très élevée
7	Les facteurs explicatifs de la variation de la TC	Question à échelle de 1 à 5 (1 : pas du tout important - 5 : très important)	Offre et demande du concentré Stock du concentré Coûts de traitement du concentré Rapport des forces sur le marché Prix du métal

Module 3 : Ajustements des firmes lors des variations de la TC

[1] Les tranches d'effectif proposées correspondent à la définition de l'INSEE de PME, d'entreprise de taille intermédiaire et de grande entreprise.

Num.	Question	Type	Réponses
8	Impact de la TC sur le profit de la firme	Question à échelle de 1 à 10	1 : impact négligeable - 10 : impact très important
9	Réaction à une hausse de la TC (anticipation de la réaction d'une firme minière)	Question à choix multiples	Augmenter le volume produit Baisse le volume produit Ne pas changer le volume produit Autre (à remplir)
10	Réaction face à un surplus de concentré sur le marché (ajustement de la TC)	Question à choix multiples	Attendre une TC plus basse pour conclure les contrats Attendre la TC plus élevée pour conclure le contrat Le niveau de la TC ne va pas affecter le nombre de contrats conclus Autre (à remplir)

Module 4 : La négociation de la TC et les réactions en cas de la TC défavorable

Num.	Question	Type	Réponses
13	La stratégie lors de la négociation du contrat	Question à choix multiples	Négociation systhématique Négociation uniquement pour les contrats importants Négociation quand la TC est élevée Absence de négociation
11	Le comportement du transformateur lorsque la TC est inférieure au coût de transformation	Question à échelle (1 : pas important - 5 : très important)	Réduction des coûts (salaires, etc.) Augmentation du volume du concentré transformé (économies d'échelle) Réduction du volume du concentré transformé Adoption d'une politique de hedging plus activé

Module 5 : Risque associé à la TC

Num.	Question	Type	Réponses
4	L'importance de la TC dans le contrat de valorisation du concentré ?	Question à échelle de 1 à 10	1 : peu importante - 10 : très importante
12	L'importance de la TC par rapport au prix du métal	Question à choix multiples	La TC est plus importante que le prix du métal La TC a autant d'importance que le prix du métal La TC est moins importante que le prix du métal La TC n'a pas d'importance Autre (à remplir)
14	Hedging de la TC	Question dichotomique	Oui Non Autre (à remplir)
15/16	L'utilisation des coefficients de variation de la TC en tant qu'outil de hedging	Question dichotomique	Oui Non Si "non" quels outils alternatifs pouvez-vous suggérer ?

Module 6 : Solution pour remplacer la TC

Num.	Question	Type	Réponses
19	Préférence pour la négociation de la TC pour chaque contrat plutôt que l'utilisation de la TC annuelle de référence	Question dichotomique	Oui Non Autre (à remplir)
20	L'attitude vis-à-vis de la fréquence des négociations	Question à choix multiples	La fréquence annuelle est suffisante La TC annuelle devrait être revue plus souvent La fréquence est plus que suffisante : revoir la TC moins souvent
21	La perception du tolling comme une alternative à la TC	Question dichotomique	Oui Non Si "oui" quelles évolutions sur le marché pourraient favoriser cette situation
17/18	Utilisation des coefficients de variation pour l'obtention du profit à court terme	Question dichotomique	Oui Non Si vous répondez "oui" pouvez-vous détailler comment vous procédez ?
22		Commentaire	Suggestions ou commentaires

Le tableau ci-dessus récapitule les six modules du questionnaire. L'ordre des questions dans le questionnaire est indiqué dans la colonne *Num.* Le questionnaire a été saisi dans GoogleForms et diffusé sous forme de lien accompagné d'un formulaire en format pdf.

Tableau F.1: Population totale : mineurs et transformateurs

	Nom	Activité	Localisation	Remarques
1	Glencore/Xstrata	mining/smelting	AUST, CAN+world	Xstrata incl (Noranda+Falconbridge) + Asturiana de Zinc + Donner
2	Teck mines and smelter	mining/smelting	PER, USA+world	
3	MMG mines	mining/smelting	AUST+CHN+world	MMG incl OZ (Zinifex + Oxiana)+ China Minmetals
4	Vedanta Resources	mining/smelting	IND, IRE+world	incl. Hindustan Zinc Limited et portefeuille zinc de Anglo American
5	Boliden mines and smelters	mining/smelting	IRE	
6	Volcan Compania Minera	mining	PER+world	
7	Votorantim mines and smelters	mining/smelting	PER	
8	Penoles mines and smelter	mining/smelting	MEX	
9	Nyrstar mines and smelters	smelting	PER, USA, CAN+world	
10	Korea zinc	smelting	KOR	
11	Huludao Zinc Co	smelting	CHN	
12	Mitsui Mining and Smelting Co	mining/smelting	JAP	
13	Sumitomo Metal Mining	mining	JAP, BLV	
14	Lundin mines	mining	CAN	
15	Hudbay mines and smelter	mining/smelting	CAN	
16	Milpo mines	mining	PER	
17	BHP mines	mining	PER+world	
18	Mitsubishi Materials Corp.	smelting	JAP, PER+world	
19	Zhuzhou	smelting	CHN	
20	Mitsubishi Materials Corp.	smelting	JAP, PER+world	
21	Kazzinc	mining	KAZ	anc. Kazzinc (part of Glencore)
22	First Quantum Minerals	mining	CAN	
23	Ivernia Inc	mining	CAN, AUST	
24	Henan Yuguang Zinc Industry	mining/smelting	CHN	
25	Northwest Mining and Geology Group (NWME)	mining	CHN	
26	Western Mining	mining	CHN	
27	Chihong Zinc & Germanium	mining	CHN	
28	China Nonferrous Metals Company Ltd	mining	CHN	
29	Trevali Mining Corporation	mining	PERU	
30	Sociedad Minera El Brocal	mining	PERU	
31	Grupo Mexico	mining	MEX	
32	Tcheliabinsk Zinc Plant (UGMK)	smelting	RUS	
33	Almaylyk Mining and Metallurgical	mining/smelting	UZB	
34	Horsehead Corp	smelting	USA	
35	Dowa Metal and Mining	mining	JAP	
36	Hachinohe Smelting	smelting	JAP	
37	Toho Smelting	smelting	JAP	
38	BRPM/Ennex	mining	MAR	
39	Zinc Corp of South Africa	mining	RSA	
40	Sierra Metals	mining	Peru	
41	Perilya Ltd	mining	AUST	
42	Baja Mining Corp	mining	MEX	
43	Griffin Mining Ltd	mining	CHN	
44	Kagara Ltd	mining	AUST	
45	Ironbark Zinc Ltd	mining	GRN	
46	Canadian Zinc Corp	mining	CAN	
47	Venturex Resources Ltd	mining	AUST	
48	KBL Mining Limited	mining	AUST	
49	Terramin Australia Ltd	mining	AUST	
50	Binani Zinc Limited	smelting	IND	
51	Padaeng	smelting	THAI	
52	Alzinc-Metanof	smelting	ALG	
53	KCM	smelting	BLG	
54	Liuzhou Smelting	smelting	CHN	
55	Sichuan Hongda Company	smelting	CHN	
56	Bafgh Zinc Smelting	smelting	IRN	
57	Miacesco Poland	smelting	POL	
58	Boleslav Poland	smelting	POL	
59	Auby	smelting	FRA	

Source : Auteur

II Analyse des profils des firmes sur la base du questionnaire

Tableau F.2: Codage des variables du questionnaire

Question	Paramètre	Modalités
Type :	M, S, T	Mineurs, transformateurs, trader
Taille :	P, AV, B	Petite, moyenne, grande
Pays :	E, NE, USA, A	Europe, hors Europe, USA, Asie
Information sur la TC :	tcimp	Importance de la TC
	inftcneg	Participation aux négociations
	inftcsub	Presse payante pour la TC
	inftccomp	Information via d'autres firmes
	inftcind	Rapports spécialisés sur la TC
Niveau de la TC en 2012	tclevel	
Facteurs explicatifs de la TC	drivsd	Offre et demande de concentré
	drivstock	Stock de concentré
	drivcost	Coût de transformation
	drivimp	Pouvoir de marché
	drivmetp	Prix du métal
Impact de la TC sur le résultat	tcpnl	
Réaction à la hausse de la TC	react	0 - réduire le volume, 1 - ne rien faire, 3 - augmenter le volume, 4 - autre
Réaction au surplus de la TC	surplus	0 - TC plus haute, 1 - n'est pas concerné, 2 - TC plus élevée, 3 - autre
TC inférieure au coût de transformation :	tclowred	Réduire les coûts
	tclowpm	Produire plus
	tclowredp	Réduire le volume
	tclowh	Développer une stratégie de couverture
TC comparée au prix du métal	tcmet	0 - pas important, 1 - moins imp., 2 - aussi imp., 3 - plus imp.
Négociations de la TC	nego	0 - jamais, 1 - quand la TC est élevée, 2 - contrats importants, 3 - toujours
Hedging de la TC	tched	0 - non, 1 - oui
Utilisation des coefficients de la TC pour la couverture	scalehed	0 - non, 1 - oui
Utilisation des coefficients de la TC pour le gain suppl.	scalepro	0 - non, 1 - oui
Négociation de la TC pour chaque contrat	tccon	0 - non, 1 - oui, 2 - autre
Fréquence des négociations	tcnego	0 - pas assez, 1 - assez, 2 - plus qu'assez
Tolling comme alternative à la TC	toll	0 - non, 1 - oui

Source : Auteur

Tableau F.3: Valeur des coefficients : Dimension 1

Variables quantitatives			**Variables qualitatives**		
Libellé	Estimate	P.Value	Libellé	R2	P.Value
tcimp_4	1,02	1,13	drivstock	0,79	1,49
surplus_0	0,55	4,55	type	0,76	3,13
toll_1	0,39	7,81	toll	0,45	7,81
drivstock_5	0,43	7,99	tcimp	0,59	2,45
S	0,36	3,34	surplus	0,51	5,02
inftcpress_2	0,53	6,72	inftccomp	0,51	5,68
tclowred_1	0,61	7	tclowredp	0,42	3,49
inftccomp_2	0,64	1,21	tclowredp	0,41	4,56
tclowredp_1	0,73	1,8	react	0,41	4,6
drivstock_1	1,16	5,87	inftcneg	0,38	7,32
S	1,34	5,87	inftcpress	0,38	8,24
inftcneg_3	0,49	6,4	drivmp	0,42	9,2
nego_2	0,27	2,19	tclevel	0,49	1,65
react_0	0,25	2,47	nego	0,18	2,19
tcpnl_3	1,01	2,76	drivsd	0,3	3,26
tclevel_4	0,95	2,76	tcpnl	0,46	4,94
tcpnl_5	0,49	2,8			
drivsd_4	0,23	3			
drivmetp_5	0,27	4,41			
tclowred_2	-0,24	4,95			
drivsd_5	-0,29	3,53			
inftcneg_5	-0,32	3,33			
nego_3	-0,27	2,19			
react_1	-0,37	1,91			
drivmp_3	-0,43	5,66			
M	-0,45	1,3			
surplus_1	-0,36	2,03			
toll_0	-0,39	7,81			

Source : Auteur

Tableau F.4: Valeur des coefficients : Dimension 2

Variables quantitatives			**Variables qualitatives**		
Libellé	Estimate	P.Value	Libellé	R2	P.Value
tccon_2	1,13	1,15	tccon	0,72	1,09
T	1,05	1,74	size	0,5	2,42
P	0,47	2,42	type	0,7	2,53
surplus_3	1,42	2,72	surplus	0,51	5,69
USA	1,52	2,72	tched	0,34	9,65
drivmp_2	0,65	3,88	scalepro	0,34	1,12
tched_1	0,34	9,65	region	0,51	1,84
scalepro_1	0,33	1,12	toll	0,27	4,57
tcpnl_4	0,64	1,53	drivmp	0,4	1,49
tcimp_7	0,57	1,71	tcnego	0,2	1,53
inftcneg_2	0,5	1,75	tclowpm	0,34	1,68
toll_1	0,28	4,57	inftcneg	0,32	2,12
tclowpm_4	0,73	6,19	tcimp	0,37	2,53
react_3	0,48	9,36			
tcnego_0	0,23	1,53			
drivstock_3	0,39	3,18			
drivmetp_2	0,28	4,81			
tclowpm_3	-0,48	4,47			
tclowh_2	-0,23	3,22			
M	-0,39	2,81			
tcnego_1	-0,23	1,53			
toll_0	-0,28	4,57			
scalepro_0	-0,33	1,12			
tched_0	-0,34	9,65			
AV	-0,47	2,42			

Source : Auteur

Tableau F.5: Valeur des coefficients : Dimension 3

Variables quantitatives			**Variables qualitatives**		
Libellé	Estimate	P.Value	Libellé	R2	P.Value
tclowpm_2	0,41	0,000	tclevel	0,86	3,68
tclowh_1	0,43	0,000	tcpnl	0,78	1,64
A	0,73	0,000	tclowh	0,41	4,72
tcpnl_1	0,83	0,000	tclowpm	0,39	5,95
tclevel_3	0,79	0,000	region	0,41	1,21
react_1	0,38	0,005	nego	0,18	2,16
inftcind_2	0,74	0,014	inftcpress	0,31	2,62
tclowredp_4	0,36	0,021	react	0,29	3,67
nego_3	0,22	0,021	drivmp	0,34	3,94
tcpnl_3	0,79	0,035	inftcind	0,21	4,95
tclevel_4	0,74	0,035			
inftcsub_3	0,28	0,044			
M	0,78	0,046			
nego_2	-0,22	0,021			
tclowredp_3	-0,28	0,020			
tclowpm_3	-0,15	0,012			
drivmp_4	-0,44	0,003			
tclevel_8	-0,62	0,002			

Source : Auteur

Annexe G

Simulations numériques et code GAMS

Nous disposons des données sur la période 1975-2014 pour lesquelles nous devons estimer les elasticités prix d'offre et de la demande. Nous estimons deux paramètres :

- Elasticité de l'offre du concentré par rapport à la TC.
- Elasticité de la demande du concentré par rapport au prix résiduel[1].

Compte tenu des irrégularités des courbes d'offre et de demande nous optons pour une estimation de l'élasticité d'arc[2]. Nous estimons d'abord les élasticités à chaque point de la courbe (équation G.1) pour avoir une idée des liens entre les variables. Les résultats montrent une grande disparité des valeurs, ce qui peut être expliqué par l'évolution de l'élasticité sous l'impact des facteurs endogènes ou exogènes au marché du concentré[3] (Voir la table G.1).

$$\epsilon(y,x) = \frac{\overline{x}}{\overline{y}} * \frac{(y_{t-1} - y_t)}{(x_{t-1} - x_t)} \tag{G.1}$$

Avec $\overline{x}$ et $\overline{y}$ les moyennes de x et y.

La forte disparité des valeurs des élasticités ne nous permet pas de nous prononcer sur une valeur en particulier à retenir pour la modélisation. Ceci qui nous amène à considérer le calcul de l'élasticité d'arc sur plusieurs années. Nos simulations étudient les évolutions présentes et à venir de la TC. Selon nous, les dix dernières années sont assez représentatives des phénomènes que nous souhaitons étudier, pour cette raison nous procédons alors au calcul de l'élasticité d'arc pour la période de 2004 à 2014.

Nous obtenons une valeur de 0.55 pour l'élasticité TC de la demande de concentré. Nous augmentons cette valeur jusqu'à 0.7 pour tenir compte d'un éventuel biais relatif au choix de la période considérée. De cette manière nous espèrons obtenir une valeur plus proche à l'élascité de court terme. La valeur de 0.37 est obtenue pour l'élasticité prix résiduel de l'offre de concentré. Nous tenons compte d'un éventuel biais relatif au choix des paramètres pour le calcul du prix résiduel, ce qui nous amène à réduire la valeur obtenue à 0.30.

[1] Le prix résiduel est estimé pour un concentré ayant le contenu métallique de 50% avec la part payable du métal de 85%.

[2] L'identification de l'élasticité dans le cadre d'une régression simple ne peut pas être facilement applicable dans notre cas. La TC et le prix résiduel correspondent aux séries qui suivent un processus DS, elles sont intégrées d'ordre 1. La demande du concentré est une série DS, intégrée d'ordre 2, alors que l'offre du concentré est un processus TS. Donc, nous avons le choix entre le calcul des élasticités ponctuelles ou bien des élasticités d'arc. Le calcul des élasticités annuelles ponctuelles donne des valeurs similaires à celles de l'élasticité d'arc en terme de signe, mais nous obtenons un nombre important des valeurs aberrantes.

[3] Les valeurs de 2001 et 2008 ne sont pas incluses dans le tableau, car lors de ces périodes la TC est restée inchangée. Le calcul des élasticités correspondantes est rendu imposisble, en raison de la valeur nulle que prend le dénominateuro.

Tableau G.1: Estimation des élasticités d'arc

Année	DC/BTC	SC/Pr
1976	0,20	0,41
1977	-3,38	-0,32
1978	-0,27	0,07
1979	2,81	0,11
1980	0,37	-0,04
1981	-0,13	-0,04
1982	-0,39	-2,08
1983	1,55	-0,17
1984	0,31	0,82
1985	-6,01	-0,66
1986	0,35	-0,07
1987	1,04	0,47
1988	0,45	-0,13
1989	0,04	0,02
1990	0,38	-0,46
1991	-0,14	-0,05
1992	-0,26	-0,19
1993	0,14	0,12
1994	0,02	0,09
1995	0,38	1,06
1996	0,42	-0,44
1997	-0,38	0,03
1998	0,25	-0,02
1999	-0,50	0,77
2000	0,55	-3,84
2001	-	-0,06
2002	-0,46	0,12
2003	-0,21	0,43
2004	-0,61	0,11
2005	0,10	0,11
2006	2,59	0,04
2007	0,08	0,78
2008	-	-0,08
2009	0,10	0,23
2010	0,41	0,17
2011	-0,08	0,28
2012	0,19	-0,31
2013	0,21	-0,09
2014	0,46	0,03
Moyenne (2004-2014)	0,55	0,37

Source : Auteur

DC/BTC : Elasticité TC de la demande de concentré
SC/Pr : Elasticité prix résiduel de l'offre de concentré

Code utilisé pour réaliser les simulations dans GAMS

Sets r Countries with mining activities / Australia, Peru, US ; /
f Processingfirms /UnionSteelTr1, UnionSteelTr2 ; /
Parameters of supply and demand ;
$KC(r)$;
$KDC(f)$;
KM ;
alpha /0.85/ Payable metal ;
Cont /0.5/ Metal content in the concentrate ;
Elasticities ; $epsilonnm$;
$epsilonnc(r)$;
$sigma(f)$;
Parameters ;
$SC0(r)$ Supply of Concentrate ;
Australia 1300 ;
Peru 1500 ;
US 700 ;
$DC0(f)$ Demand for Concentrate ;
UnionSteelTr1 500 ;
UnionSteelTr2 3000 ;
UnionSteelTr1 : European country and UnionSteelTr2 : China ;
$PR0$ Residual Price ;
$SM0(f)$ Suppy of metals ;
$TC0$ Treatment Charge /200/ ;
$DM0$ Demand for metals ;
$PM0$ Price of metals /2500 / ;
BMP Base Metal Price /2000/ ;
ESC Scale /0.1/ ;
$A0(f)$ Individual recovery rate ;
/UnionSteelTr1 0.85 ;
UnionSteelTr2 0.85 ;
epsilonnm $= 0.68$;
epsilonnc(r) $= 0.3$;
sigma(f) $= 0.7$;
calibration ;
$DC0('UnionSteelTr1') = sum(r, SC0(r)) - DC0('UnionSteelTr2')$;
$SM0(f) = DC0(f) * A0(f)$;
$PR0 = (alpha * Cont * PM0 - (TC0 + (PM0 - BMP) * ESC))$;
$*PR0 = (alpha * Cont * PM0 - TC0)$;
$KC(r) = SC0(r)/(PR0 ** epsilonnc(r))$;
$KDC(f) = DC0(f)/(TC0 ** sigma(f))$;
$DM0 = sum(f, SM0(f))$;
$KM = DM0/(PM0 ** (-epsilonnm))$;
Variables ;
$SC(r)$ Supply of Concentrate ;
$DC(f)$ Demand for Concentrate ;

PR Residual Price;
$SM(f)$ Suppy of metals;
TC Treatment Charge;
DM Demand for metals;
PM Price of metal;
Equations;
$SC_Eq(r)$ Equation Supply of Concentrate;
$DC_Eq(f)$ Equation Demand for Concentrate;
$SM_Eq(f)$ Equation Suppy of metals;
TC_Eq Equation Treatment Charge;
DM_Eq Equation Demand for Metals;
PR_Eq Equation Residual price;
PM_Eq Equation Price of Metals;

$SC_Eq(r)..SC(r) = e = KC(r) * PR**epsilonnc(r)$;
$DC_Eq(f)..DC(f) = e = KDC(f) * TC**sigma(f)$;
$SM_Eq(f)..DC(f) = e = SM(f)/A0(f)$;
$TC_Eq..(TC0 + (PM0 - BMP) * ESC)/(alpha * Cont) + PR/(alpha * Cont) = e = PM$;
$*TC_Eq..(TC0/(alpha * Cont) + PR/(alpha * Cont)) = e = PM$;
$DM_Eq..DM = e = KM * PM**(-epsilonnm)$;
$PR_Eq..sum(r, SC(r)) = e = sum(f, DC(f))$;
$PM_Eq..sum(f, SM(f)) = e = DM$;
Model treatmentcharge /all/;
Solve treatmentcharge using cns;
SR(f)=SM.l(f)*PM.l+(TC.l+(PM.l-BMP)*ESC)*DC.l(f)+(break);
DC.l(f)*(A0(f)-alpha)-DC.l(f)*PM.l*alpha*Cont-CT(f)*SM.l(f);
*Revenues : metal supply (SM*PM);
* TC (fixed part TC*DC and variable part ((PM.l-BMP)*ESC)*DC;
* free metal(A0(f)-alpha)*DC;
Expenses : concentrate demand DC(PM*alpha*Cont);
* production costs (SM*CT) per ton of metal;
*SR(f)=SM.l(f)*PM.l+TC.l*DC.l(f)+DC.l(f)*(A0(f)-alpha)-DC.l(f)*PM.l*alpha*Cont-CT(f)*SM.l(f;
* return expression for the case III.1;
USR(f) = SR(f)/SM.l(f)/1000;
*MR(r) = SC.l(r)*PR.l;
*UMR(r) = MR(r)/SC.l(r)/1000;
* For simplification purposes we consider that mining costs are equal to zero;

Liste des Tableaux

1.1 Réduction des capacités des grandes mines du monde entre 2013 et 2016 40

1.2 Composition du concentré spécifique recherché par la société Lisheen Milling Ltd 50

1.3 Redevances minières et impôts sur les sociétés pour une sélection de pays 52

1.4 Eléments valorisés dans le concentré 62

1.5 Estimation des coefficients de long terme 87

1.6 Coefficients d'ajustement du modèle à correction d'erreur 88

2.1 Etude des dérivées partielles de la TC 141

2.2 Estimation des relations de causalité 151

3.1 Volume de production des firmes 183

3.2 Scénario 1 - Variation du taux de recouvrement pour le transformateur T1 . . . 187

3.3 Scénario 2 - Variation des coûts de production du transformateur T2 188

3.4 Scénario 3 - Variation du contenu métallique 189

3.5 Coefficients de corrélation 206

3.6 Profits unitaires des firmes selon le type de TC 217

3.7 Variation de la part du métal payable 219

3.8 Modification des coefficients de variation de la TC 220

3.9 Matrice des pertes et des gains associés aux évolutions futures 222

3.10 Stratégies des firmes de la filière pour réduire les nouveaux risques 228

A.1 Production minière du concentré de zinc par pays 270

A.2 Transformation du concentré de zinc par pays 271

A.3 Liste des principales mines en exploitation partagée 272

A.4 Composition de neuf types de concentrés mélangés pour optimiser le processus de transformation 273

A.5 Taxes minières dans une sélection de pays : exemple du cuivre 273

B.1 Test de racine unitaire et identification du processus 276

B.2 Choix de la structure du modèle sur la base des critères d'information 276

B.3 Etude des relations de cointégration 276

E.1 Estimation du modèle ARIMA (2, 1, 0) 292

E.2 Estimation du modèle ARMA (1,0) 294

F.1 Population totale : mineurs et transformateurs 303

F.2 Codage des variables du questionnaire 304

F.3 Valeur des coefficients : Dimension 1 305

F.4 Valeur des coefficients : Dimension 2 305

F.5 Valeur des coefficients : Dimension 3 306

G.1 Estimation des élasticités d'arc 309

Liste des Graphiques

1 Étapes de production du métal et sources associées de revenu 3

2 Schéma simplifié du paiement du métal contenu dans le concentré 4

3 Etapes de la production de zinc 7

4 TC de Base (1975-2014) 11

5 L'importance de la TC 13

1.1 Production minière du concentré de zinc en 2014, milliers de tonnes 34

1.2 Réserves (connues) de zinc en 2014, milliers de tonnes 35

1.3 Principaux mineurs de concentré de zinc (volume exprimé en milliers de tonnes de zinc) 36

1.4 Evolution du contenu métallique du minerai australien 39

1.5 Principaux transformateurs du concentré de zinc (volume exprimé en milliers de tonnes de zinc) 42

1.6 Filière type de la production et de la consommation de zinc 47

1.7 Comparaison des coûts de transformation en Europe et en Chine 51

1.8 Sources d'information sur la TC 63

1.9 "La boîte noire" de la filière 64

1.10 Représentation de l'Hypothèse 1 65

1.11 Représentation de l'Hypothèse 2 65

1.12 Représentation de l'Hypothèse 3 66

1.13 Les étapes d'ajustement au sein de la filière 68

1.14 Cycle d'ajustement du métal et du concentré 69

1.15 Réponse aux variations de la TC 69

1.16 Facteurs explicatifs de la TC 70

1.17 Ecart entre offre et demande et la TC de base 71

1.18 Monopole versus Concurrence Pure et Parfaite 73

1.19 Matrice des profits du mineur et du transformateur en fonction de la structure de la filière 76

1.20 Schéma du partage du profit 79

1.21 TC de base, prix du zinc et stock de concentré 84

1.22 TC de base, prix du zinc et stock de concentré, variables en différences premières 85

1.23 Fonctions de réponse impulsionnelle 90

1.24 Partage du profit entre les mineurs et les transformateurs de zinc 91

1.25 Partage observé du profit entre les mineurs et les transformateurs 92

1.26 Matrice des profits du mineur et du transformateur en fonction de la structure de la filière et des transactions 94

2.1 Vision historique de la TC et des échanges du concentré 115

2.2 Déséquilibre des capacités de transformation 116

2.3 Ajustement des capacités de transformation 118

2.4 Décomposition de la formule du concentré 123

2.5 Liens entre les marchés du concentré et du métal 125

2.6 Production minière à perte 136

2.7 Equilibre simultané sur le marché du concentré et le marché du métal 142

2.8 Part de la TC dans la valorisation du concentré de zinc 147

2.9 TC de base et prix du zinc 148

2.10 Correlogramme croisé : TC de base et prix du zinc 149

2.11 La part de la TC de base dans le prix du zinc de base 150

2.12 Causalité entre les variables du contrat du concentré et les variables réalisées . . 152

2.13 L'importance de la TC sur le résultat des firmes 159

2.14 Négociez vous la TC contrat par contrat ? 160

3.1 Liens entre la TC, le profit et la structure de la filière 177

3.2 Représentation schématique de limites des fluctuation de la TC 180

3.3 TC réalisée (1975-2014) 181

3.4 Les variables de la filière 183

3.5 Composants du modèle 184

3.6 Surplus du concentré 197

3.7 Réaction en cas de hausse de la TC 199

3.8 Réactions du transformateurs lorsque le niveau de la TC est bas 200

3.9 Anticipations des réactions du transformateurs lorsque le niveau de la TC est bas 201

3.10 Attitude vis-à-vis de la négociation de la TC 202

3.11 Choix entre la TC annuelle et la TC négociée pour chaque contrat 203

3.12 Appréciation de la fréquence annuelle des négociations 203

3.13 Représentation des variables 207

3.14 Représentation des observations par individu 209

3.15 TC fixe et TC variable 218

3.16 Utilisation du hedging de la TC 229

3.17 Utilisation des coefficients de variation de la TC en tant qu'outil de hedging . . 230

3.18 Obtention du profit à court terme en utilisant les coefficients de variation de la TC 230

3.19 Niveaux de la TC traduisant une stabilité de la filière 237

3.20 TC de base (valeur réelle) 239

3.21 Seuils calculés de la TC pour l'année 2009 240

D.1 Schéma du polynome 286

E.1 TC de base annuelle (1975-2014) 290

E.2 TC spot (01/01/1988-31/12/2014) 293

Liste des Encadrés

1.1 Fixation du prix 56

1.2 Primes appliquées 57

1.3 Application des coefficients de variation de la TC 59

1.4 Application de la déduction unitaire 61

1.5 Calcul du rendement net (NSR) 93

3.1 Fixation du prix 208

3.2 Fixation du prix 231

Table des Matières

Introduction Générale **1**

1 La TC comme instrument de coordination **25**

Introduction 27

I Zinc concentré et métal : origines, acteurs, technologie 30

I.1 Origines de la production de zinc : concentré, métal principal et autres métaux du minerai 31

I.2 Les acteurs de la filière 36

I.2.1 Les mineurs 36

I.2.2 Les transformateurs 41

I.2.3 Filière type et choix de la localisation 46

II La TC dans le cadre du contrat du concentré 54

II.1 La présentation du contrat 54

II.1.1 Contrat du concentré et ses clauses standard 55

II.1.2 La TC : pièce maîtresse du contrat du concentré 58

II.1.3 Eléments spécifiques de la valorisation du concentré 60

II.2 Quelle modélisation pour la TC ? Hypothèses de travail et schéma de la filière 62

III L'hypothèse 1 : la TC en tant qu'instrument de coordination de la filière 66

III.1 L'interdépendance des firmes de la filière : approvisionnements et interactions stratégiques 67

III.1.1 Coordination par la TC : stocks et contraintes de flux 67

III.1.2 Interactions stratégiques et structure de la filière : l'équilibre des profits 72

III.2 La validation empirique de la TC en tant que variable de coordination (benchmark) . . . 81

III.2.1 Relation de cointégration entre la TC, le prix du métal et le stock 82

III.2.2 Modélisation des dynamiques de long terme entre les variables . 87

III.2.3 Partage du profit et TC dans un oligopole bilatéral : quelles alternatives ? . . . 91

Conclusion . . . 96

2 La TC en tant que prix **99**

Introduction . . . 101

I Le rôle central du prix dans l'analyse en équilibre de marché . . . 103

I.1 Hypothèses associées aux prix dans la modélisation économique . . . 104

I.1.1 Le rôle du prix dans un système de prix relatifs . . . 104

I.1.2 Les fonctions d'un prix . . . 107

I.2 Quel prix pour le marché du concentré ? . . . 114

I.2.1 Le rôle historique de la TC : prix de transformation et définition des programmes de production . . . 115

I.2.2 La TC de base aujourd'hui : vecteur d'information pour un équilibre partiel . . . 118

I.2.3 Quel niveau de prix pour le marché du concentré ? . . . 124

II La modélisation de la TC dans le cadre de l'équilibre partiel . . . 130

II.1 Interactions entre les mineurs et les transformateurs dans le cadre d'un marché . . . 130

II.2 Modèle calculable d'équilibre simultané sur le marché du concentré et le marché du métal . . . 137

III La TC en tant que quasi-prix : validation . . . 144

III.1 Stratégie empirique visant la validation de la TC en tant que prix . . . 144

III.1.1 Quel objet et quelle série pour la procédure de test ? 145
III.1.2 Les liens entre la TC et le prix du métal 148
III.1.3 Le modèle Cobweb appliqué à la TC 153
III.2 La TC en tant que prix : quel sentiment de marché ? 157
III.2.1 La TC vue par les firmes de la filière 158
III.2.2 Une transition vers un véritable prix du concentré ? 161

3 Rôle, variations et futur de la TC 167

Introduction 169
I La filière de zinc : un système dynamique en équilibre instable 172
I.1 La TC et l'équilibre de la filière 173
I.1.1 La nature de la TC 173
I.1.2 Stabilité ou rupture de l'équilibre : TC et transmission des chocs 176
I.2 Equilibre de la filière : chocs passés et canaux de transmission 182
I.2.1 Calibrage du modèle et choix des scénarios 182
I.2.2 Quelles conséquences pour les évolutions de la TC ? 186
II Evolutions de la TC : anticipations et scénarios futurs 191
II.1 Niveau et variations de la TC : la perception des acteurs 192
II.1.1 Présentation du questionnaire et statistiques descriptives 192
II.1.2 Les acteurs du marché et la TC : profils 204
II.2 Les évolutions à venir de la TC et du contrat de concentré 211
II.2.1 Pourquoi les firmes estiment qu'une évolution de la TC est nécessaire ? 212
II.2.2 Les scénarios possibles d'évolution 216
II.3 Les évolutions de l'environnement productif et financier 223

II.3.1 La modification de l'environnement productif 224

II.3.2 Vers une nécessaire gestion du risque de la TC 227

III Prospective pour la filière du zinc 233

III.1 Stratégies d'avenir : coopération ou passager clandestin ? 235

III.2 L'apparition de nouveaux acteurs 242

Conclusion Générale **249**

Bibliographie **255**

A Elements chiffrés sur la filière du zinc **269**

B Compléments sur les tests de racine unitaire **275**

C Maximisation du profit du mineur et du transformateur **277**

I Maximisation du profit du transformateur 277

II Maximisation du profit du mineur 279

D Résolution du système d'équations de l'équilibre partiel **281**

I Résolution du système d'équations de l'équilibre partiel 282

II Calcul des fonctions dérivées partielles de la TC 284

E Procédure de Box et Jenkins appliquée aux séries de la TC **289**

F Etude du questionnaire **295**

I Présentation du questionnaire 296

II Analyse des profils des firmes sur la base du questionnaire 304

G Simulations numériques et code GAMS **307**

Liste des Tableaux 314

Liste des Graphiques 318

Liste des Encadrés 319

Table des Matières 325

Colophon

Le document final comporte 328 pages dont 254 pour le texte principal. La bibliographie contient 237 références.

Citation : VOSTRETSOVA EKATERINA (2015), *Rôles et Comportement des Treatment Charges dans la valorisation des concentrés métalliques*, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux. 328 pages.

Rôles et Comportement des *Treatment Charges* dans la valorisation des concentrés métalliques

Résumé : Nous analysons la coordination des firmes au sein de la filière de production du zinc métallique. Nous identifions cinq critères déterminant le comportement de production des firmes. Une variable de coordination est nécessaire pour trouver un équilibre entre ces cinq critères. Cette variable de coordination est la Treatment Charge (TC) qui correspond à une déduction du prix du minerai au titre des frais de transformation en métal. Nous proposons deux hypothèses quant à la nature de la TC : variable de prix et variable technique d'équilibre de la filière. Nous concluons que sur le long terme la TC a un comportement proche d'un prix. Cependant, à court et moyen terme elle se rapproche d'une variable de coordination technique garantissant les débouchés, les approvisionnements et un revenu minimum aux firmes. Nous concluons que la TC est un indicateur avancé de la stabilité de la filière : l'évolution de celle-ci témoignerait du changement de l'organisation de la filière. La filière est stable lorsque la TC évolue au sein de bandes de fluctuation, dans la logique d'un « serpent dans le tunnel » : sortie de ces limites, la TC indique une instabilité voire une dissolution probable de la coordination. Nous anticipons une évolution de la TC vers plus de flexibilité du fait des clivages grandissants entre anciens et nouveaux acteurs de la filière. Nous nous prononçons pour cette évolution du fait de la complexification de la filière qui la rend nécessaire, notamment du développement des contrats de court terme. Nous identifions cependant un risque pour les approvisionnements en zinc si la TC venait à disparaitre complètement. Nous suggérons que le maintien de la nécessaire coordination de la filière passe par un partage des investissements dans une logique similaire au partage des profits afin de surmonter les défis posés par l'environnement productif.

Mots-clés : Zinc, Industrie minière, Concentré métallique, Treatment Charge (TC), Valorisation du concentré métallique

Roles and Behaviour of *Treatment Charges* for the valuation of metal concentrates

Abstract: We analyse firms coordination within the zinc metal production industry. We first identify 5 criteria determining the production pattern of the firms. We stress how a coordination variable is needed to strike a balance between these constraints, this variable being the Treatment Charge (TC). The TC is a deduction from the price of zinc metal to pay for its transformation from concentrate to metal. We offer two hypotheses on the nature of the TC: either a standard price variable, or a coordination variable based ont he technical equilibrium of the industry. We conclude that the TC behaves as a price in the long run, but very much like a coordination tool in the short run. It also plays a role in distributing profits between firms, hence granting stability to the balance of market power in the industry. Therefore, the TC is an advanced warming indicator for the stability of the market organisation of the zinc industry. The industry organisation is stable when the TC fluctuates within the limits of values (like a "snake in the tunnel"). If the TC hits one of the limits, the balance is offset and the industry moves towards competition. We expect such an evolution in the medium term, with the TC becoming more flexible as a result. Nonetheless, should the TC be scraped altogether and replaced by a market price, the stability of the industry supply chain might be at risk. We conclude with some advice for the industry, sketching a first best scenario where firms of the industry would not only share profits but also investment plans. This would be the best way to resist the external pressures currently threatening to tear out the industry to reorganise it for the sole purpose of short-run financial gains.

Keywords: Zinc, Mining, Metal Concentrate, Treatment Charge, Valuation

JEL classification: L720, Q210

Laboratoire d'analyse et de recherche en économie internationales (Larefi)
- Avenue Léon Duguit - 33608 Pessac - France