

Recyclage vs extraction minière: concurrence, externalités environnementales et politiques publiques sur les marchés du fer et de l'acier

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay
préparée à Université d'Evry-Val-d'Essonne

Ecole doctorale n°578 Sciences de l'Homme et de la Société
(SHS)
Spécialité de doctorat : Sciences Economiques

Thèse présentée et soutenue à Evry, le 20 Septembre 2019, par

SYLVAIN SOURISSEAU

Composition du Jury :

Mireille CHIROLEU-ASSOULINE Professeur, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne (Paris School of Economics)	Présidente
Jean DE BEIR Maître de Conférences, Université Paris Saclay-Evry Val d'Essonne (EPEE)	Directeur de thèse
Mouez FODHA Professeur, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne (Paris School of Economics)	Examineur
Alain GELDRON Expert National Matières Premières, ADEME (Direction Economie Circulaire et Déchets)	Référent ADEME
Philippe MAHENC Professeur, Université de Montpellier (Center of Environmental Economics)	Rapporteur
Philippe QUIRION Directeur de recherche, Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CNRS-CIRED)	Rapporteur

L'Université PARIS-SACLAY n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse. Ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur.

Remerciements

« Quand rien n'est prévu, tout est possible »! Non, cette citation ne provient pas d'un économiste ni d'un philosophe. C'est celle d'un globe-trotter nommé Antoine de Maximy qui, pour assouvir sa soif de voyages et de rencontres, a pu compter sur l'amabilité d'autrui pour le gîte et le couvert. Une aide précieuse qui a complètement modifié la physionomie de ses voyages de quelques jours ou quelques semaines. Ce parallèle ne vient pas juste du fait que j'apprécie tout particulièrement ses émissions, mais plutôt que moi aussi, l'aide dont j'ai pu bénéficier depuis de nombreuses années m'a été précieuse, tant pour assouvir ma curiosité intellectuelle, assurer ma stabilité psychologique et terminer ce travail de thèse, que pour dessiner mon parcours professionnel depuis plus de dix ans. La forme de mes remerciements est moins spectaculaire qu'un reportage sur France 5, l'audience un peu plus faible, mais l'importance que j'accorde à ces mots n'en est pas moins forte.

Rien ne me prédestinait à faire une thèse en économie. Je n'ai ni eu de révélation lors de mes premiers cours de SES au lycée, désolé Monsieur Deruette, ni éprouvé un amour particulier pour la micro en amphi à l'Université, désolé Monsieur Ouisse. Si point de départ il doit y avoir, il se situerait plutôt en 2008 où ma prise de conscience sur les enjeux environnementaux est née lors d'un séjour d'études d'un an au Danemark. Dès lors, la conviction que l'économie pouvait être à la fois une grille de lecture indispensable pour comprendre l'état du monde actuel, et à la fois un gisement de solutions pour répondre à ces enjeux, s'est peu à peu forgée. Il s'en est suivi un certain nombre de rencontres, discussions et quelques opportunités saisies pour pouvoir proposer ce travail doctoral aujourd'hui, dont

les contours ont été esquissés progressivement au gré des doutes, des nombreuses fausses pistes et des innombrables remises en question. Bien que construite et écrite par mes soins, cette thèse a bénéficié de nombreux soutiens. Des remerciements non exhaustifs mais au combien importants s'imposent.

Je tiens donc tout d'abord à remercier mon directeur de thèse, Jean De Beir, pour son encadrement, sa présence régulière, ses jeux de mots et son optimisme, malheureusement pas toujours contagieux, tout au long de la thèse. De notre première rencontre au Ministère lors de la présentation de l'étude sur les Certificats de Recyclage Négociables, à cette fin de thèse, six années se sont écoulées et un lien d'amitié s'est créé. Merci Jean. Le bon encadrement dont j'ai bénéficié est aussi à mettre au crédit de l'Ademe. En particulier, je remercie chaleureusement Alain Geldron pour sa disponibilité et pour les connaissances sur les matières premières qu'il m'a transmises au gré de nos discussions. Je pense aussi à toute l'équipe du service Produits et Efficacité Matière, notamment Jean Charles Caudron, Jérôme Betton et Roland Marion, ainsi qu'Adeline, Rachel, Eric et tous les autres avec qui j'ai passé six mois très enrichissants sur les plans humain et professionnel.

Je tiens aussi à remercier tout particulièrement Madame et Messieurs les membres du jury, Mireille Chiroleu-Assouline, Mouez Fodha, Philippe Mahenc et Philippe Quirion, pour avoir accepté de participer à l'évaluation de cette thèse. Leurs remarques et conseils lors de la pré-soutenance ont été précieux et c'est un immense honneur que de présenter ce travail devant eux.

En remontant quelques années en arrière, rien n'aurait été possible sans l'appui de Marion Prost. Son écoute et sa confiance en mon projet d'intégrer le Master d'Economie à Nantes m'ont donné la possibilité de poser la première pierre à l'édifice. Des remerciements qui s'adressent également aux enseignants-chercheurs et doctorants que j'ai croisés lors de mon séjour à l'Université d'Ottawa. Je pense surtout à Louis Hotte sans qui ce séjour n'aurait pas été possible, à Gamal Atallah pour ses conseils, ainsi qu'à Myra Yazbeck, Paul Makdissi, Alexandre Sauquet, Oc-

tavian Strimbu, Diego Hotte et Jean-Baptiste Tondji pour m'avoir si bien accueilli et permis d'affronter les -40 degrés de février avec une certaine sérénité. Je tiens aussi à remercier Thomas Vallée (Université de Nantes) pour ses conseils, Marcel Genêt (LaPlace Conseil), Claude Marchand (Ministère de l'Economie et des Finances), Bernard Bertier (Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux), Jean-Pierre Gaudin et Tess Pozzi (Federec) ainsi que Ross Bartley (Bureau International du Recyclage) pour leur disponibilité lors des entretiens, et pour tous les éléments d'information qu'ils m'ont transmis afin de mieux comprendre les marchés du recyclage, du minerai de fer et de la sidérurgie.

Au chapitre du quotidien, mes collègues doctorants à l'Université d'Evry ont joué un rôle très important. Merci à Amira, Rahma, Zhun, Laetitia, Julia, Jordi, Ibrahima, Aymeric, Thomas, Thien, My et Maryème pour tous les bons moments que nous avons partagés. J'adresse un merci tout particulier à Damien Dejeufosse, pour sa bonne humeur, son écoute et pour être un chargé de cours exemplaire. Et puis, un merci tout aussi particulier à Erica et Laurent. Vous m'avez aidé et avez répondu présents à chaque instant. Grâce à vous, j'ai rencontré bien plus que des collègues à Evry. Merci! Je pense aussi à tous les enseignants-chercheurs de l'Epee et notamment Thaï Ha-Huy avec qui j'ai collaboré, Fabien Tripier, Olivier Baguelin, Michel Guillard, ainsi qu'à Maria-Eugenia Sanin pour tous ses conseils avisés. Mes remerciements s'adressent également à Sylvie Guerin et Brigitte Bichara, puis à Patricia Bailleron, notre secrétaire du département d'Economie, pour sa patience et son accompagnement à toute épreuve face à la torpeur administrative qui parfois nous accable. Comment parler du quotidien sans évoquer mes actuelles colocataires, Aurélie et Léo. En plus de supporter mes sautes d'humeur, mon stress et mes angoisses, vous avez toujours répondu présentes quand il le fallait. Merci infiniment à vous deux!

Bien entendu, cette page de remerciements ne peut être conclue sans un immense merci à mes parents, ma famille. Devant leur perplexité face à cet objet

inconnu qu'est la thèse, ils m'ont fait confiance et m'ont moralement soutenu lorsque ça n'allait pas, de la même manière qu'ils l'ont toujours fait lors de mes choix d'études et de travail. Mention spéciale pour ma sœur Lucie, qui, à l'aube de mes 20 ans telle Madame Soleil me voyait encore à l'école après 30 ans! Je ne le montre pas toujours et j'en suis désolé, mais c'est dans ces circonstances que je mesure à quel point j'ai de la chance d'être aussi bien entouré.

Je garde mes dernières pensées pour mes formidables amis de Boussay, de Paris, pour Ambre, Jodie, Thomas et bien d'autres, toujours curieux de mon travail et sur lesquels je peux toujours compter. Un merci particulier que j'adresse également à Gino, pour ses conseils et pour m'avoir fourni un bureau temporaire à Nantes. Enfin, mille mercis à Sarah, Sandie, Romuald, Kristina, Magali et Fanny pour le temps consacré à la relecture.

Résumé

Tout en étant une solution de gestion des produits en fin de vie, le recyclage s'avère être une alternative à la production de matières premières vierges. Dans le cadre de cette thèse, nous nous interrogeons donc sur cette nouvelle forme de concurrence que peut potentiellement apporter les recycleurs, sur un marché des matières premières traditionnellement dominé par un oligopole minier. Dans quelle mesure les recycleurs peuvent-ils concurrencer les firmes minières et quels sont les effets sur l'oligopole? Comme deuxième axe de recherche, nous tenons compte du différentiel d'externalités environnementales qui existe entre les deux types d'offre. Nous intégrons donc dans notre modèle une subvention au recyclage ainsi qu'une taxe sur la pollution minière, ceci, en réponse aux deux distorsions de marché que sont la structure non concurrentielle de l'extraction minière et les externalités qui sont associées à cette activité. Pour donner une dimension empirique à cette thèse, nous utilisons les marchés du minerai de fer et de l'acier.

Préalablement à l'analyse de la concurrence avec les recycleurs, nous effectuons dans le cadre du **Chapitre 1**, une analyse de l'évolution des marchés du fer et de l'acier suite au choc de demande des années 2000. La concentration de la demande autour des sidérurgistes chinois ainsi que la stratégie mise en place par les autorités à partir de 2010, aboutissent à l'existence d'un monopsonne contrarié sur le marché mondial du minerai de fer.

En se recentrant sur l'amont de la chaîne de valeur, notre **Chapitre 2** pose le cadre théorique de la concurrence entre les entreprises minières et les recycleurs. A

travers un modèle Cournot-Stackelberg, nous montrons que la part de marché du secteur minier augmente avec le degré de concurrence de ce secteur. Les recycleurs ne peuvent en effet pas augmenter de manière significative leur part de marché si une technologie de recyclage efficace n'est pas, dans le même temps, associée à une importante disponibilité de déchets. Cette double condition est également nécessaire pour garantir la diminution de la rente minière. Par ailleurs, nous mettons en avant l'existence d'un niveau de technologie de recyclage minimum pour que les recycleurs puissent entrer sur le marché.

La prise en compte du différentiel d'externalités environnementales dans le **Chapitre 3** renforce la nécessité d'une augmentation de l'offre de matières secondaires, au regard de son effet bénéfique sur le bien-être. L'instauration d'une taxe environnementale sur la production minière s'avère, à cet effet, moins pertinente qu'une subvention au recyclage. La taxe renforce la contrainte de capacités pour les recycleurs, repose sur une nécessaire évaluation de la pollution minière difficile à réaliser pour certaines matières premières, et des limites quant à sa mise en œuvre semblent également se poser. A l'inverse, l'instauration d'une subvention au recyclage aurait des effets significatifs sur les parts de marché des recycleurs et sur la nécessaire baisse des dommages liés à l'extraction. Comme nous le montrons, la différence d'effets entre les deux politiques est d'autant plus forte lorsque le niveau de recyclage initial est faible.

Enfin, en s'intéressant à une politique publique axée sur la demande de matières plutôt que sur l'offre, le **Chapitre 4** met en exergue la faible incitation du marché européen du carbone sur la baisse des émissions de CO₂ des sidérurgistes, et donc sur un potentiel recours accru à la matière secondaire. Nous montrons également comment cette politique climatique interfère avec la politique de concurrence car elle bénéficie essentiellement aux leaders du marché, au détriment du principe de concurrence libre et non faussée qui prévaut au sein du marché commun. Plus surprenant, nos résultats indiquent que le leader du marché est la firme la moins

efficace dans la consommation de matières premières, par rapport à la quantité d'acier produite et aux émissions de CO₂ générées. A l'inverse, la firme qui semble être la plus efficace est, dans le même temps, celle qui aurait été la moins avantagée dans l'attribution des quotas gratuits depuis 2007.

Mots-clés : recyclage des métaux, oligopole minier, pouvoir de marché, matières premières, sidérurgie, marché du carbone

Abstract

In addition to a solution for managing end-of-life products, recycling is also an alternative to the production of virgin raw materials. In this thesis, we are therefore wondering about this new form of competition that could potentially include recyclers, on a commodity market traditionally dominated by a mining oligopoly. To what extent can recyclers compete with mining firms and what are the effects on oligopoly? As a second line of research, we consider the differential of environmental externalities that exists between the two types of supply. We therefore include in our model a recycling subsidy and a tax on mining pollution, in response to the two market distortions: the non-competitive structure of mining extraction and the externalities that are associated with this activity. To give an empirical dimension to this thesis, we use the iron and steel industry.

Prior to the analysis of the competition with recyclers, we carry out in **Chapter 1**, an analysis of the evolution of the markets of iron and steel following the demand shock since the year 2000. The concentration of the demand from Chinese steelmakers as well as the strategy put in place by the authorities from 2010, led to a new market structure of the world iron ore market: a thwarted monopsony.

By focusing on the upstream value chain, **Chapter 2** sets the theoretical framework for competition between mining firms and recyclers. Through a Cournot-Stackelberg model, we show that the market share of the mining sector increases with the degree of competition in this sector. Recyclers cannot significantly increase their market share if an efficient recycling technology is not associated with

a high availability of waste. This dual condition is also necessary to ensure the reduction of the mining rent. In addition, we highlight the requirement of a minimum level of recycling technology for recyclers to enter the market.

Taking into account the differential of environmental externalities in **Chapter 3** strengthens the need for increasing the supply of secondary materials, with regard to its positive effect on social welfare. For this purpose, the introduction of an environmental tax on mining extraction is less relevant than a subsidy for recycling. The tax reinforces the capacity constraint for recyclers, relies on a necessary assessment of mining pollution that is difficult to achieve for certain raw materials, and there are limits on its implementation which also seem to arise. On the other hand, the introduction of a recycling subsidy would have a significant impact on recyclers' market share and the necessary reduction of extraction-related damages. As we show, the difference in effects between the two policies is even stronger when the initial level of recycling is low.

Finally, by focusing on a public policy based on the demand for materials rather than on supply, **Chapter 4** highlights the weak incentive of the EU-ETS to reduce CO₂ emissions from steelmakers, and therefore a potential increase of the secondary input instead of the virgin one. We also show how this climate policy interferes with the EU competition policy because it mainly benefits market leaders, to the detriment of the principle of free and undistorted competition prevailing in the EU market. More surprisingly, our results indicate that the market leader is the least efficient firm in the consumption of raw materials, considering the quantity of steel produced and the CO₂ emissions generated. Conversely, the firm that seems to be the most efficient would also have been least favoured when free allowances were allocated from 2007 onwards.

Keywords: metal recycling, mining oligopoly, market power, raw materials, steelmaking, EU-ETS

Sommaire

Remerciements	i
Résumé	v
Abstract	ix
Sommaire	xii
Introduction	1
I Les marchés mondial du fer et de l'acier : du choc de demande des années 2000 à l'émergence d'un monopsonne contrarié	25
II The effect of recycling on a mining oligopoly : competition for market shares and collusion for market power	95
III Welfare and public policies within a recycling-mining competi- tion framework	143
IV The EU Emissions Trading System and the steelmaking indus- try : Climate policy <i>vs</i> Competition policy	190
Conclusion générale	227
Bibliographie	237
Liste des figures	259

Liste des tableaux	262
Table des matières	264

Introduction

1 Economie linéaire et économie circulaire

Le modèle linéaire extraction-production-consommation-élimination tel qu'il est pratiqué depuis l'ère industrielle a atteint ses limites. La soutenabilité de ce modèle est remise en cause tant en amont, avec la raréfaction des ressources sur la base des rythmes de consommation actuels, qu'en aval, avec l'accumulation de déchets post-consommation ¹. Ce constat n'est pas nouveau. A cette dimension quantitative s'ajoute une dimension qualitative marquée par la dégradation de l'environnement et dont la prise de conscience est plus récente. Perte de biodiversité, dégradation des sols, des eaux, de la qualité de l'air, changement climatique, sont autant de conséquences qui résultent de nos modes de production et de consommation basés sur un schéma linéaire.

Pour répondre à ces défis de disponibilité des ressources, d'accumulation de déchets et de dégradation environnementale, le terme « économie circulaire » est apparu depuis plusieurs années et suscite un intérêt grandissant auprès des acteurs économiques, des gouvernements, des citoyens et du monde universitaire. En 2010, la navigatrice britannique Ellen MacArthur lance sa fondation éponyme consacrée à la diffusion de l'économie circulaire. Par opposition à l'économie linéaire, elle définit ce concept comme étant « un nouveau système industriel fondé sur la mise en place de cycles de production et de consommation en boucles, découplés

¹Selon les estimations de la Banque Mondiale, 4 milliards de tonnes de déchet sont produits chaque année (hors agriculture et construction).

Source : <https://www.planetoscope.com/dechets/363-production-de-dechets-dans-le-monde.html>

de l' extraction de ressources non renouvelables ». De son côté, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (Ademe) définit trois pôles conceptuels et de recherche (Figure 1) : la production et l'offre de biens et de services, la consommation (demande et comportement) et la gestion des déchets.



FIGURE 1 – L'économie circulaire (source : Ademe)

Derrière ce concept général visant à boucler les flux de matières à chaque étape du cycle de vie, on distingue plusieurs activités économiques, dont le recyclage. Véritable pierre angulaire de l'économie circulaire, le recyclage crée la boucle permettant à une matière intégrée dans un flux de déchets de retourner dans le processus de production. Les autres activités comme le réemploi ou la réparation, sont également importantes dans la mesure où elles améliorent la productivité de la ressource et limitent la création de déchets. Toutefois, leur poids en tant qu'activité économique reste relativement faible en comparaison du recyclage ². Nous considérons le recyclage comme étant l'opération qui consiste à transformer un déchet en un produit ou une matière première. Dès lors, le « recycleur » est l'acteur économique qui, une fois en possession du déchet, lui fait subir une ou plu-

²Les activités de réemploi-réparation ont généré un chiffre d'affaires d'un milliard d'Euros en 2016 (source : Ademe), contre 8.15 milliards pour les activités de recyclage (source : Federec) en France.

sieurs opérations de valorisation, et le revend à un autre agent économique ³. Par souci de simplification, nous considérons dans nos travaux théoriques l'existence d'un seul recycleur représentatif, en charge de la collecte et de la transformation du déchet.

L'intérêt de l'économie circulaire ne réside pas seulement dans ce qu'elle véhicule en tant que nouveau modèle sur les plans de la préservation de la ressource et de moindres externalités environnementales. En effet, dans la mesure où il nous semble inconcevable de substituer un modèle à autre, l'analyse que nous proposons dans le cadre de cette thèse consiste à tenir compte de la cohabitation entre économie linéaire et économie circulaire. Plus précisément, nous nous concentrons sur l'amont de la chaîne de valeur où les recycleurs, en proposant une matière première secondaire, concurrencent les entreprises minières, producteurs de la matière première vierge. Cette concurrence s'exerce donc sur le marché de l'approvisionnement en matières premières, comme le montre la Figure 2.

Traditionnellement, c'est un marché dominé par les firmes minières et principalement non concurrentiel. Elles peuvent théoriquement exercer un pouvoir de marché sur les industriels de la métallurgie, de la même manière qu'elles peuvent adopter des stratégies potentielles pour limiter l'entrée de nouveaux entrants, qu'ils soient extracteurs de minerais, ou recycleurs. Ainsi nous nous interrogeons sur les interactions entre ces deux acteurs en termes d'organisation industrielle.

- Dans quelle mesure les recycleurs peuvent-ils concurrencer les entreprises minières ?
- Quel est l'effet de la présence des recycleurs sur l'oligopole minier, et quelle pourrait être leur réaction en termes de stratégies ?

³La collecte n'est pas une activité de recyclage en tant que telle car le déchet ne fait l'objet d'aucune transformation. En revanche, cette étape peut être incluse dans la définition du recyclage, dans la mesure où les recycleurs peuvent être en charge, partiellement ou totalement, de cette opération. Dans une autre conception, que nous ne retenons pas ici, le recycleur est parfois considéré comme l'industriel qui utilise une matière première secondaire (*e.g.* le papetier, le sidérurgiste, le plasturgiste).

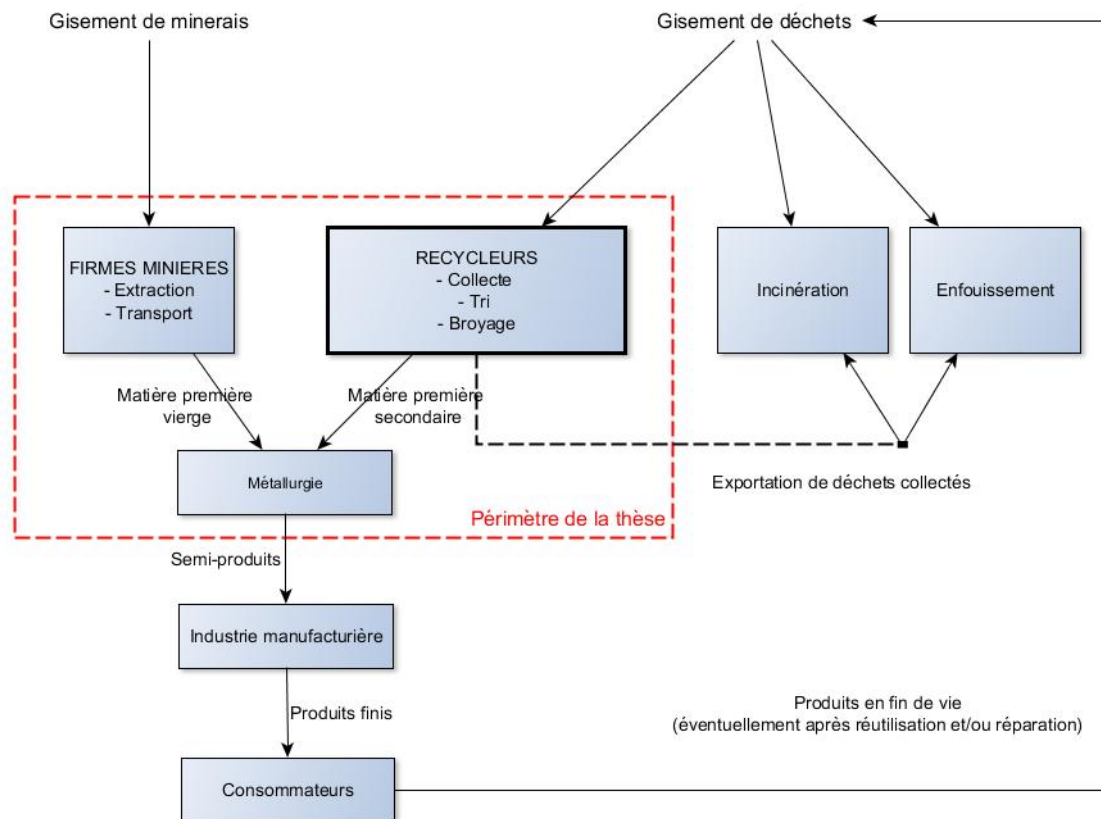


FIGURE 2 – Schéma simplifié de la chaîne de valeur de la matière et cadre de travail de la thèse

De plus, nous étendons l'analyse en tenant compte du différentiel d'externalités environnementales entre les deux offreurs, ce qui nous amène à observer l'effet de politiques publiques sur la concurrence, le niveau de pollution lié à l'offre de matières et plus généralement, sur le bien-être. Les effets de ces politiques semblent incertains compte tenu des liens particuliers entre recycleurs et entreprises minières, où ces dernières déterminent *ex-ante* la contrainte de production du secteur secondaire.

- Comment le bien-être est affecté par la présence simultanée d'une filière de recyclage, d'un oligopole minier et d'externalités environnementales ?
- Au regard des distorsions de marché, est-il préférable de taxer la pollution de l'entreprise minière ou subventionner le recycleur ?

Dans l'approche théorique, nous nous concentrons sur les matières premières minérales de base ⁴ (*e.g.* fer, aluminium, nickel, cuivre, plomb, zinc, chrome), alors que dans une approche empirique nous analysons de manière plus approfondie les marchés du minerai de fer et de l'acier.

2 Les marchés du minerai de fer et de l'acier

Le choix de cette matière s'explique pour plusieurs raisons. Tout d'abord, la filière de recyclage du fer et de l'acier est relativement bien développée dans la plupart des pays. Bien que des différences subsistent, la technologie de recyclage est maîtrisée et l'existence d'une concurrence avec les entreprises minières pour approvisionner les sidérurgistes en matières première est donc possible. De plus, la structure de marché de l'extraction minière est fortement marquée par l'existence d'un oligopole depuis de nombreuses années. Comme le montre la Figure 3, l'Australie et le Brésil se partagent le haut du classement avec respectivement 54% et 24% de parts de marché en 2016 (source des données : World Steel Association).

Historiquement, trois grands groupes miniers étaient en activité dans ce marché oligopolistique : Vale (Brésil), Rio Tinto (Australie-Royaume Uni), BHP Billiton (Australie). Or, depuis le début des années 2000, une quatrième firme s'est jointe à ce trio : Fortescue Metals Group (Australie). En effet, si la consommation mondiale de minerai de fer est restée à peu près stable dans les années 90, les années 2000 ont marqué un tournant avec la croissance très élevée des économies émergentes. En particulier, la Chine est rapidement devenue un acteur majeur dans la production sidérurgique, et donc, dans la demande de minerai de fer. De 120 millions de tonnes en 2000, sa production a dépassé les 830 millions de tonnes en 2017.

En plus de proposer un bref historique de l'évolution du marché, notre premier chapitre se penche donc sur les effets du choc de demande sur la structure de marché et sur le pouvoir de marché des entreprises minières. Les faits stylisés qui sont décrits dans ce chapitre mettent en évidence le bouleversement de la

⁴Des références aux matières premières de spécialité comme les Terres Rares sont également faites de manière ponctuelle.

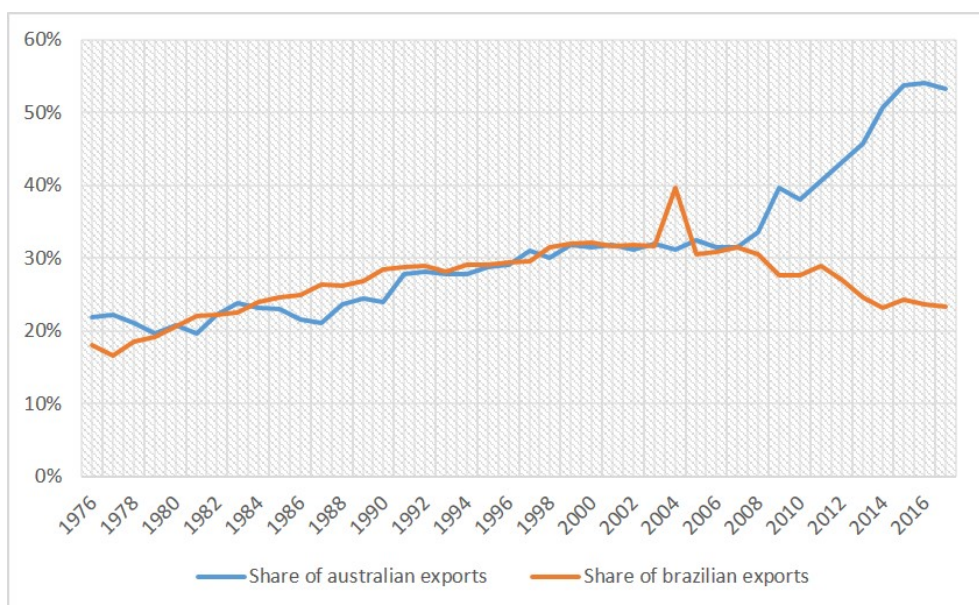


FIGURE 3 – Parts de marché de l’Australie et du Brésil dans l’offre de minerai de fer

filrière sidérurgique mondiale suite à ce choc. L’oligopole bilatéral en place pendant plusieurs décennies et en œuvre lors des négociations de gré à gré pour fixer le prix du minerai, s’est en effet transformé en un oligopole traditionnel du fait de l’élargissement des marchés de consommation. Le rôle du gouvernement chinois dans l’économie domestique a ensuite été prépondérant afin de créer, à l’échelle mondiale, un monopsonne contrarié. Si la position de force des entreprises minières sur le marché de l’approvisionnement en minerai de fer s’est révélée au cours des années 2000, celle-ci s’est ensuite contractée avec le ralentissement de la croissance chinoise.

L’arrivée des pays émergents sur la scène internationale a accentué les enjeux de la disponibilité des ressources minières, et par conséquent, mis en évidence la nécessité de trouver une alternative à l’offre de matières premières vierges, en l’occurrence le recyclage.

3 Le recyclage en tant qu'objet de la science économique : une nouvelle approche de la ressource

L'industrie du recyclage amène les économistes à renouveler leur rapport à la notion de ressource. On peut ainsi distinguer une dimension temporelle avec l'augmentation de la durée de vie de la ressource, mais également une dimension géographique avec l'accès à un gisement qui, bien qu'initialement situé sur des territoires bien spécifiques en raisons de facteurs géologiques notamment, peut se relocaliser sur n'importe quel territoire avec le développement d'une filière de recyclage. On parle alors de « mine urbaine ».

3.1 La prise en compte du recyclage dans la disponibilité d'une ressource dans le temps

Traditionnellement dans la théorie économique, les ressources naturelles sont, à l'instar du capital et du travail, considérées comme des facteurs de production. En revanche, elles se différencient par le fait qu'elles ne sont pas produites par l'homme mais résultent d'un processus naturel. Parmi l'ensemble des ressources, il est d'usage de faire la distinction entre les ressources renouvelables et non renouvelables, c'est-à-dire entre les ressources dont l'exploitation peut être quantifiée selon un stock qui est forcément amené à diminuer avec son exploitation, et celles dont l'utilisation peut être quantifiée selon un flux, qui peut être positif si la régénération de la ressource s'effectue à un rythme plus élevé que le prélèvement, ou négatif si le prélèvement lié à l'activité humaine est supérieur au rythme de régénération naturel. Cette classification en fonction du critère temporel permet d'entrevoir le rôle du recyclage, qui, dès lors, tend à remettre en cause le caractère non durable d'une ressource, sans pour autant en faire une ressource renouvelable.

Dans le *Traité d'Economie Politique*, Say (1803) prétendait que « les richesses naturelles sont inépuisables, car, sans cela, nous ne les obtiendrions pas gratuitement. Ne pouvant être ni multipliées, ni épuisables, elles ne sont pas l'objet

de sciences économiques ». Toujours au cours du 19^{ème} siècle, si Malthus (1798) s'est intéressé aux liens entre épuisement des ressources naturelles et croissance démographique, Ricardo (1817), dans *Des Principes de l'Economie Politique et des Impôts*, s'est penché sur la question de l'exploitation de la ressource par le propriétaire terrien. Selon son analyse, ce dernier devrait exploiter la ressource dès que son coût d'extraction est inférieur au prix. Dans son raisonnement, et parce que, à l'image de la citation de Say (1803), le caractère non renouvelable de la ressource n'est pas encore acquis dans le paradigme économique de l'époque, il oublie que la ressource ne se reconstitue pas, qu'elle est définitivement perdue et qu'il existe donc un coût d'opportunité de la diminution du stock disponible pour les usages futurs, qui s'ajoute au coût d'extraction.

Plusieurs décennies plus tard, les théories sur l'exploitation optimale d'une ressource sont donc apparues. Gray (1914) a démontré l'intérêt qu'avait le détenteur d'une ressource à différer l'exploitation de la mine. C'est ensuite Hotelling (1931) qui, dans *The Economics of Exhaustible Resources*, approfondie la relation prix de la ressource - taux d'extraction, et détermine une règle de gestion optimale *via* la théorie microéconomique du producteur ⁵. L'identification de cette règle revient à déterminer le rythme d'extraction de la ressource qui apportera au producteur le plus de revenus sur l'ensemble de la période d'exploitation du gisement. Dans ses travaux, Hotelling estime qu'à chaque période, le détenteur d'une ressource est confronté à un arbitrage entre extraire la ressource *in situ* (*i.e.* en terre) et vendre maintenant, ou attendre la période suivante pour extraire puis vendre. Il montre ainsi que le prix de la ressource croît avec l'épuisement du gisement, et que ce rythme de croissance est corrélé avec le taux d'intérêt, ce qui provoque l'existence

⁵Les travaux d'Hotelling (1931) s'inscrivaient dans un mouvement global de conservation des ressources épuisables particulièrement fort aux Etats-Unis entre 1890 et 1920 (*i.e.* *the Conservation Movement*). Ils n'ont en revanche eu que peu d'échos les années et décennies suivantes, où l'attention était davantage portée sur la crise des années 30 et la Seconde Guerre mondiale. Les premières références aux travaux d'Hotelling (1931) sont donc venues plus de 30 ans après avec Barnett et Morse (1963) dans leur article intitulé *Scarcity and Growth*, ainsi que dans le célèbre rapport du Club de Rome emmené par Denis Meadows : *Limits to Growth* (Meadows *et al.*, 1972).

d'une rente de rareté, c'est-à-dire un profit positif dont l'amplitude est définie par le prix net du coût marginal d'extraction. Sous sa forme originelle, la « règle d'Hotelling » est basée sur un certain nombre d'hypothèses assez restrictives, mais a progressivement fait l'objet d'extensions par Hotelling lui-même, puis par d'autres économistes quelques décennies plus tard ⁶. A partir des données sur les prix de plusieurs matières premières (*e.g.* cuivre, plomb, charbon) aux Etats-Unis entre 1870 et 2004, Gaudet (2007) n'observe en revanche pas de tendance du prix des matières à la hausse et ses observations font plutôt état d'une importante volatilité du taux de croissance du prix autour de zéro. Sur la base de nombreux travaux empiriques, Slade et Thille (2009) confirment le fait que la règle de Hotelling n'est pas fréquemment observée dans la littérature empirique, en dépit des extensions qui peuvent être apportées au modèle ⁷. Parmi les principales raisons, il semble que les découvertes de nouveaux gisements ainsi que le progrès technique ont joué un rôle majeur. La mécanisation de l'activité d'extraction ces dernières décennies a en effet permis aux firmes minières de réduire fortement leurs coûts. Cette tendance s'est notamment observée sur le marché du minerai de fer où les principales firmes ont, en quelques années, diminué leur coût d'extraction de moitié. Parallèlement, de nouvelles techniques de prospection sont apparues et de nouveaux gisements ont été découverts. En revanche, il nous semble difficilement envisageable que le progrès technique puisse contrer la baisse inéluctable de la qualité du minerai, ainsi que la hausse du prix des inputs, comme l'eau et l'énergie, et donc la hausse du coût d'extraction.

Dans ce contexte, en considérant l'évolution à la hausse du prix de la ressource, au moins sur le moyen et le long terme, il semble pertinent de se pencher sur le report de la demande vers un substitut, d'autant plus avec une ressource essen-

⁶Pour plus de détails, nous nous référons à la revue de littérature de Gaudet (2007). Par ailleurs, le chapitre 2 reprend les modifications d'hypothèses relatives à la structure de marché de l'extraction et à l'apparition d'un substitut.

⁷Dans leur étude, Slade et Thille (2009) évoquent les nombreuses approches possibles pour estimer la validité, ou non, de la règle de Hotelling. Ceci conduit nécessairement à des différences, parfois substantielles, dans les résultats. Ils pointent également les difficultés méthodologiques, notamment économétriques, lors de l'estimation de la rente.

tielle. Dans ces conditions, le recyclage apparaît comme une offre de substituts, et donc comme un facteur potentiellement perturbateur des conditions de marché et d'extraction d'une ressource non renouvelable. Seulement, parmi les ressources non renouvelables toutes ne sont pas forcément recyclables.

Dans leur typologie, Pearce et Turner (1991) distinguent des ressources comme les énergies fossiles et les forêts par exemple, dont l'homme peut gérer l'utilisation pour éviter ou retarder l'épuisement mais qui ne sont pas recyclables, des matières premières minérales pour lesquelles l'homme peut non seulement gérer l'utilisation mais également y associer une activité de recyclage en aval. Au même titre que pour la recherche de nouveaux gisements, le recyclage tend effectivement à repousser l'échéance de l'épuisement de la ressource. Sur le plan économique, ces deux moyens représentent un investissement et ont pour effet de modifier la trajectoire optimale du prix. Si la découverte d'un nouveau gisement n'a pour effet que de repousser l'épuisement de la ressource et donc la hausse de son prix, le recyclage peut en revanche, sur le plan théorique, rendre la ressource renouvelable s'il est effectué à 100%. Ce scénario reste en revanche théorique en raison des pertes de matières, c'est-à-dire avec la disparition d'une fraction de la ressource à chaque phase d'utilisation. Tout d'abord, le gisement mis sur le marché à une date t n'est pas entièrement récupéré. Lors du processus de récupération du déchet, stade que tôt ou tard l'ensemble du gisement extrait à cette date t atteindra, une fraction est exclue du processus de recyclage car il n'a pas fait l'objet d'une collecte sélective et a donc été transféré vers un autre moyen de traitement des déchets que le recyclage (*c.f.* Figure 2). Ensuite, le processus de recyclage induit également une perte de matière pour des raisons techniques. Une fois utilisée à des fins de production et/ou de consommation, la ressource vierge subit donc deux taux de déperdition qui vont jouer à chaque bouclage de la matière entre la production, la consommation, le déchet et la (re)production. Leur produit peut s'assimiler à un épuisement naturel de la ressource sur le plan quantitatif.

Sur le plan théorique, De Beir (2002) reprend le modèle sur les ressources

pétrolières de Pakravan (1977) et l'applique à une ressource métallique *in situ*. Il montre que, suite à l'extension indirecte du gisement de ressources provoquée par le recyclage, comme il pourrait l'être par la découverte d'un nouveau gisement dans le cas d'une ressource énergétique non renouvelable, la trajectoire optimale d'évolution du prix connaît un rythme moins soutenu mais reste tendanciellement à la hausse. Dès lors, la rente de rareté se maintient car la fin du gisement est seulement différée. Quand bien même il serait possible de recycler à des taux très élevés, une réflexion sur la disponibilité et la préservation de la ressource suscite nécessairement un questionnement sur la demande exercée pour cette ressource. Raisonner sur le plan dynamique en considérant que la demande n'est pas stable au cours du temps, permet en effet d'apprécier l'éventuelle efficacité du recyclage. Dans l'absolu, il n'est bien évidemment pas question de remettre en cause la pertinence de cette activité pour la préservation de la ressource dans le temps, mais *a priori*, une évolution à la hausse de la demande tend à augmenter le prix de la ressource et favorise ainsi l'extraction, puis, *in fine*, son épuisement.

Dans une étude empirique, Grosse (2010) étudie le rôle du recyclage dans ce schéma traditionnel de production-prix-consommation d'une ressource naturelle. Pour illustrer l'impact positif du recyclage sur le plan statique, il considère par exemple un taux de recyclage de 80% ce qui permet de diviser par cinq, le besoin en ressources primaires : un gisement estimé à 100 ans deviendrait ainsi un gisement de 500 ans ! Une telle approche souffre cependant non seulement d'une réalité où un taux de recyclage de 80% est difficilement concevable pour la majorité des ressources, mais surtout d'une réalité où la consommation de la plupart des ressources n'est ni stable ni en régression. Dans l'hypothèse où le niveau de croissance de la consommation est de 3% par an sur 100 ans et avec 80% de recyclage, l'épuisement du gisement ne serait alors plus atteint au bout de 500 ans mais au bout de 135 ans ; puis 160 ans avec un rythme de 2% par an. A taux de recyclage constant, cet exemple tend donc à relativiser l'impact du recyclage par rapport à la tendance de consommation de la ressource. Grosse (2010) arrive à la conclusion que l'épuisement d'une ressource est inévitable lorsque l'évolution du

taux de consommation excède 1% par an. Dans le cas contraire, il estime qu'un ralentissement significatif de la tendance conduisant à l'épuisement n'est possible qu'avec un taux de recyclage d'au moins 80%. Un tel résultat est bien entendu à mettre en perspective selon les contextes propres à chaque matière première, mais confirme bien que le recyclage reste un moyen important pour lutter contre l'épuisement d'une ressource. En revanche, il ne permet pas de le stopper. Outre cette dimension temporelle, le recyclage permet également d'appréhender la notion de gisement sous une autre forme, et notamment en bouleversant la répartition géographique traditionnelle des dotations factorielles.

3.2 La remise en cause du gisement traditionnel de matières premières avec l'existence du recyclage : la notion de « mines urbaines »

Historiquement, le besoin en ressources pour alimenter une production industrielle était relativement faible. De quelques éléments métalliques en 1980, une carte mère d'ordinateur en compte aujourd'hui plusieurs dizaines. Cette hausse de la diversité des ressources nécessaires à la production s'est accompagnée d'une augmentation de la demande. Dès lors, en trente ans, les découvertes de nouveaux gisements se sont multipliées. Le développement des échanges internationaux et la baisse de coût du transport, ont en parallèle permis aux pays richement dotés en ressources minérales comme l'Australie, le Canada, la Russie et certains pays d'Amérique du sud, de pouvoir exporter. Bien qu'également dotés de ressources sur leur territoire, certains pays industriels ont progressivement été contraints de fermer leurs sites d'extraction, car leurs gisements se sont avérés de moins bonne qualité et donc trop coûteux à exploiter face aux concurrents susmentionnés. Dans un tel contexte où la polarisation entre les pays exportateurs de ressources car richement dotés, et les autres pays industriels s'est accrue, l'activité de recyclage vient brouiller la notion de gisement traditionnel en permettant à ces derniers d'exploiter des gisements urbains et de limiter leur dépendance vis-à-vis des pays

exportateurs. Il y a presque 50 ans, Jacobs (1970) faisait déjà référence au potentiel de recyclage de certains métaux en parlant des villes comme étant les « mines du futur ». Ce type de gisement repose sur les infrastructures, les équipements électriques et électroniques et plus généralement, tout type de déchets recyclables. Dès lors, les dotations en matières premières ne dépendent plus uniquement des configurations géologiques du sous-sol de chaque pays, mais également d'un niveau de développement économique en général, et d'une consommation de matière première par habitant en particulier, que l'on peut qualifier d'épargne matérielle et dont la disponibilité dépend de la durée de vie des produits.

Dans ce nouveau contexte, l'existence d'un gisement urbain comme alternative au gisement naturel peut avoir des effets macroéconomiques directs. Dussaux et Glachant (2018) ont estimé dans une étude empirique qu'augmenter le recyclage de 10% entraîne une diminution des importations de matières premières de 2%. Ce résultat montre les effets que peut avoir l'exploitation d'un gisement urbain sur la balance commerciale et donc sur les échanges internationaux. Par ailleurs, comme le souligne Henry-Wittmann (1996) dans son article, le recyclage est également à même de fournir une solution aux problèmes d'approvisionnement liés non seulement à l'épuisement des réserves, mais aussi à l'irrégularité des livraisons de certains pays fournisseurs, ce qui n'est pas sans influence sur les cours. A long terme, cette forme de relocalisation de l'accès aux matières premières entraînerait une diminution des flux de matières premières à travers le monde, par conséquent, une baisse des cours, et pourrait donc atténuer les effets du syndrome hollandais dont souffrent théoriquement les pays exportateurs ⁸.

Sur le plan microéconomique, nonobstant les caractéristiques propres à chaque matière, le gisement urbain reste très décentralisé et diffus. Cette configuration implique des coûts supplémentaires liés à la collecte des déchets et constitue une

⁸Même si l'impact de l'activité d'exportation des ressources naturelles sur le reste de l'économie est difficile à mesurer, et bien entendu, varie selon les pays, des études empiriques ont nuancé l'existence du syndrome hollandais. Koutassila (1998) a par exemple démontré que la théorie n'était pas applicable pour les cas du Congo et du Cameroun.

limite au développement du recyclage en raison d'économies d'échelle plus difficiles à réaliser par rapport à l'activité minière (Ayres, 1997). L'obstacle économique de taille pour le recyclage est qu'à partir d'un certain seuil, le coût nécessaire à la collecte du gisement urbain reste en général, supérieur au prix de la matière première vierge. Cependant, cet avantage pour la filière primaire décline avec l'augmentation du gisement en volume et en valeur (*i.e.* ce qui facilite donc les économies d'échelle), avec l'efficacité de la collecte et des systèmes logistiques, ainsi qu'avec les coûts de transport. Hollander and Lasserre (1988) introduisent par exemple les coûts de transaction dans leur analyse. Ces coûts sont d'autant plus élevés que la valeur du déchet à collecter est faible. Le détenteur n'est en effet pas incité à mettre à disposition le déchet pour les recycleurs, et peut faire le choix de le jeter. L'OCDE (2007) estime également que des coûts de transaction comme la recherche du gisement de déchets, de sa qualité, ou encore la négociation commerciale avec le détenteur représentent une barrière importante au développement du recyclage. Une fois cette étape de collecte du gisement effectué et à l'instar de l'extracteur dont l'objectif est d'isoler au maximum le minerai de la roche, le recycleur va donner de la valeur à sa matière première, en l'occurrence le déchet, en séparant les différents composants qui sont associés et qu'il souhaite revendre à l'industrie de transformation.

Cette étape s'apparente à une forme de « déproduction ». Les facteurs capital et travail s'assemblent désormais non plus pour transformer le facteur terre en semi-produit ou produit fini, mais pour reconstituer la matière première initiale. A l'image de son rôle crucial pour faciliter l'extraction des ressources il y a quelques décennies, le progrès technique tient un rôle majeur dans l'industrie du recyclage. Plus le déchet récupéré du gisement urbain et transformé en matière première secondaire aura les mêmes propriétés que la matière première vierge, plus son attractivité sera renforcée car le potentiel de substitution augmenté. Dans la littérature, la différence de compétitivité entre deux substituts a été formalisée par Herfindhal (1967) dans ce qu'il nomme le *Least Cost First Principle*. Il montre que lorsque le coût marginal de production diffère entre plusieurs ressources renouve-

lables, l'équilibre ne peut être atteint que lorsque la ressource qui affiche le coût marginal le plus faible est extraite en priorité.

3.3 La concurrence en amont entre entreprises minières et recycleurs

Au-delà de ces réflexions généralistes sur la manière dont le recyclage bouleverse la disponibilité des ressources dans le temps et dans l'espace, nous nous penchons dans le chapitre 2 sur la façon dont il peut concurrencer l'activité minière. Un modèle *leader(s)-followers* nous permet ainsi d'étudier l'effet de l'arrivée d'une frange concurrentielle de recycleurs sur le marché de l'approvisionnement des matières premières, dominé par un oligopole. Différents paramètres tels que le nombre d'entreprises minières, l'efficacité du recyclage, le taux de croissance de la demande ou encore la disponibilité de déchets sont modélisés car ils peuvent influencer plus ou moins fortement l'effet du recyclage sur les parts de marché du secteur et sur la rente des entreprises minières. Nous mettons de côté l'analyse sur la dynamique d'extraction de la ressource car on considère que toute baisse de l'exploitation minière causée par le recyclage est bénéfique pour le maintien de la ressource. Le travail théorique mené s'associe donc davantage à une réflexion d'économie industrielle, plutôt qu'à une réflexion en économie des ressources naturelles.

4 La soutenabilité de l'offre de matières premières : autre enjeu de développement du recyclage

En plus d'apporter une réponse, au moins partielle, à la raréfaction des matières premières, l'économie circulaire et les activités qui y sont associées, avec en premier lieu le recyclage, revêtent également d'une importance particulière au regard des dommages environnementaux traditionnellement associés à l'économie linéaire, dont l'extraction est la base. Il y a plus de 50 ans déjà, Krutilla (1967) soulignait

dans son article *Conservation Reconsidered*, que l'attention devrait moins se porter sur les ressources extraites en elles-mêmes que sur les conséquences destructrices de leur extraction et de leur exploitation sur l'environnement. En effet, les externalités environnementales associées à l'activité minière sont multiples et justifient d'autant plus la nécessité de stimuler le recyclage et ainsi modifier le mode d'approvisionnement en matières premières.

4.1 Identification des externalités

Comme le soulignent Pearce et Turner (1991), les activités minières, plus que tout autre secteur d'activités, impliquent potentiellement des dommages significatifs et souvent irréversibles sur l'environnement. Ces dommages diffèrent fortement en raison des nombreux facteurs pouvant influencer la nature et l'amplitude des externalités. A titre d'exemple, la production de minerais *via* une mine souterraine consomme davantage d'énergie pour la ventilation et pour le pompage d'eau qu'une production à ciel ouvert ⁹. Outre les consommations énergétiques, les externalités varient également en fonction de la technologie d'extraction utilisée, du type de minerai, de sa teneur, ou encore de la profondeur et de l'étendue du gisement. Celles-ci s'étendent sur les différentes étapes associées à l'exploitation d'un gisement minier, comme le montre la Figure 4.

Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) précise ainsi dans son rapport : « les volumes concernés et la dimension du facteur temps attachés à un site minier contribuent à différencier les activités minières des autres activités industrielles » (BRGM, 2003). Si dans les années 1970 la réglementation peu exigeante n'incitait pas les exploitants à prendre en compte les aspects environnementaux, ils sont désormais tenus d'anticiper la fermeture du gisement dès la phase de développement, c'est-à-dire une fois que le gisement a été jugé profitable

⁹L'exploitation d'une mine à ciel ouvert est notamment décidée en fonction du taux de découverte, c'est-à-dire du ratio de volume de roche stérile qui doit être enlevé par volume de minerai. Lorsque ce taux devient trop important, l'exploitation à ciel ouvert n'est pas suffisamment rentable. Dans ce cas et si les teneurs du minerai le permettent, une exploitation en mine souterraine, méthode plus coûteuse, peut être mise en œuvre.

et donc que les travaux de construction des installations peuvent commencer.

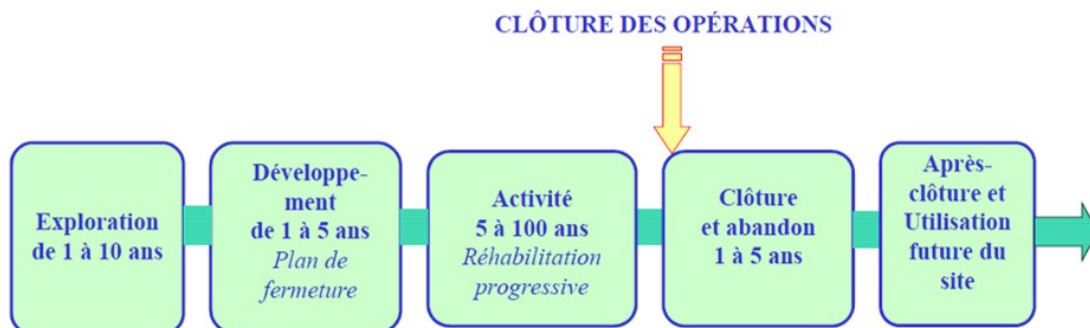


FIGURE 4 – Déroulement d'une opération minière (source : BRGM)

Dans son ouvrage consacré aux impacts environnementaux de l'industrie minière, Jain (2016) fait un état des lieux global des externalités. Concernant l'impact sur l'air, les émissions de polluants n'affectent pas seulement la qualité de l'environnement proche avec le rejet de métaux lourds, de dioxyde de soufre ou encore de Polluants Organiques Persistants (POP), mais l'impact est également plus global, avec des émissions de méthane et de dioxyde de carbone.

L'utilisation de certaines substances génère également une pollution des sols ayant un impact direct sur la faune et la flore terrestre. En parallèle, l'extraction minière peut provoquer des changements physiques sur les sols comme, par exemple, des affaissements. Ceci est particulièrement vrai pour les mines souterraines. Ils peuvent se produire soit en période d'activité soit de nombreuses années après que la mine ait été abandonnée. Selon l'amplitude de l'affaissement, lui-même dépendant de la profondeur du gisement ou encore des caractéristiques topographiques des lieux, des modifications plus ou moins structurelles peuvent se produire sur les écosystèmes environnants. L'écoulement de l'eau peut alors être altéré et provoquer à court ou moyen terme un assèchement de la source en aval. Enfin, du fait de son empreinte au sol très importante, l'activité minière est source de destruction d'aménités (*e.g.* habitat, régulation de l'eau, capture de carbone). On parle alors d'externalités liées au changement d'affectation des sols.

Sur le plan quantitatif, l'activité d'extraction est très consommatrice d'eau. Durant le cycle minier, l'étape de flottation consistant à séparer la roche stérile des minerais est, avec plus de 80% pour l'extraction du cuivre (Gunson *et al.*, 2012), celle qui consomme le plus de ressources en eau. Bien que l'activité minière représentait environ 1% dans le prélèvement total de la ressource en 2010 aux Etats-Unis, son niveau a augmenté de 39% par rapport à 2005, avec +54% pour les prélèvements d'eaux profondes (USGS, 2014)

Sur le plan qualitatif, la vulnérabilité de la ressource est liée d'une part aux interconnexions existantes entre les eaux de surface (*i.e.* en contact direct avec l'atmosphère), et d'autre part à celles entre les eaux de surface et les eaux souterraines (*i.e.* eaux se trouvant sous la surface et qui s'infiltrant dans le sol *via* des pores ou des fissures). Les contraintes physiques existantes et délimitant les sources d'eau constituent une limite à la diffusion des potentielles nuisances. Une telle externalité s'avère donc moins diffuse qu'une pollution de l'air mais conserve le caractère multilatéral et non rival. Dans leur article sur les impacts de l'activité minière sur l'eau, Ochieng *et al.* (2010) considèrent le drainage minier acide (DMA) comme l'un des problèmes environnementaux les plus sérieux dans l'industrie minière. Caractérisé selon le BRGM comme étant un « phénomène d'origine naturelle amplifié par l'activité humaine », le DMA correspond à une acidification du milieu environnant *via* les résidus miniers générés au cours de la production et toujours « en activité » une fois la mine fermée et non réhabilitée. Ces résidus constituent une source importante de pollution dans la mesure où, riches en sulfure, ils génèrent des effluents acides qui peuvent être chargés en métaux. En contact avec l'air et l'eau, un phénomène d'oxydation se produit, comme l'illustre la Figure 5.

Le DMA contamine ainsi les ressources en eau et au-delà des impacts dommageables sur les écosystèmes aquatiques, puis par répercussion sur la santé humaine, peut provoquer une corrosion des infrastructures minières et des équipements, et ainsi auto-entretenir le phénomène. Sans intervention humaine, le DMA est un processus lent et n'a qu'un très faible impact sur l'environnement (US EPA, 1994).



FIGURE 5 – Effet du DMA sur la ressource en eau (source : Nasa)

Avec l'exploitation des gisements miniers, le DMA constitue en revanche une externalité diffuse et durable sur plusieurs années, voire plusieurs décennies selon la taille du gisement, le type de minerai et l'environnement extérieur (*i.e.* climat et réseau hydrologique notamment).

Par ailleurs, la firme peut également favoriser la pollution de l'eau de manière plus directe. En effet, même si les conditions d'acidification ne sont pas pleinement réunies, certaines substances toxiques utilisées dans le processus d'extraction dans sa globalité, peuvent se retrouver en contact direct avec les cours d'eau, soit *via* un déversement volontaire de la part de la firme, soit *via* un écoulement naturel provoqué par une montée des eaux par exemple. Des métaux lourds comme l'arsenic, le plomb ou le mercure peuvent ainsi contaminer les eaux de surface et affecter les habitats et la faune aquatique, puis potentiellement l'eau à destination de la consommation. Une contamination durable de la ressource et des écosystèmes environnants peut également se produire à plus long terme.

4.2 L'introduction des externalités environnementales et des politiques publiques dans l'analyse

L'analyse de la concurrence et des interactions entre le recyclage et l'activité minière ne peut qu'être partielle si celle-ci ne tient pas compte de l'écart d'externalités environnementales entre les deux activités. C'est l'objet du troisième chapitre où nous proposons une extension du modèle théorique en introduisant les dommages liés à l'extraction, ainsi que les politiques publiques visant à les internaliser. Par souci de simplification, nous excluons du périmètre d'analyse les externalités associées aux différents modes de traitement de déchets auxquels les produits en fin de vie sont destinés lorsqu'ils ne sont pas recyclés, à savoir l'incinération ou l'enfouissement. Inclure cette étape du cycle de vie n'aurait pas d'intérêt majeur dans la mesure où cela ne ferait que renforcer les effets externes négatifs de l'extraction par rapport au recyclage. De la même façon, nous ne tenons pas compte des potentiels dommages du recyclage et considérons donc dans notre approche théorique des externalités minières nettes de celles du recyclage. Néanmoins, dans notre approche empirique sur le marché du fer et de l'acier, nous incluons les externalités en aval, c'est-à-dire celles associées à la production d'acier à partir de matière première primaire ou de matière première secondaire. Le processus de production est en effet différent et l'écart en matière d'externalités environnementales, significatif. A la différence du chapitre 2 dont l'approche est essentiellement industrielle, le chapitre 3 livre une analyse en termes d'économie de l'environnement. A cet égard et compte tenu des enjeux, nous introduisons donc l'existence de politiques publiques visant à internaliser les effets externes. D'une manière générale, le dilemme auquel les pouvoirs publics sont confrontés revient à faire un arbitrage entre le financement d'une activité relativement vertueuse, ici le recyclage, et la taxation d'une activité plus néfaste, ici l'activité minière. Un arbitrage d'autant plus complexe que les deux activités sont directement reliées à court terme à travers le prix, et à plus long terme à travers les quantités. L'effet de la mise en place de l'une ou l'autre des politiques est donc incertain. On

note également la possibilité d'une différence dans le degré de faisabilité. Si l'activité de recyclage est localisée, l'activité minière peut non seulement être éloignée géographiquement, et donc soumise à une autorité publique différente, mais peut aussi être très concentrée comme c'est le cas pour le minerai de fer, ce qui facilite les stratégies et limite l'efficacité des politiques publiques.

Dans la lignée de ce troisième chapitre à dominante théorique, nous consacrons un dernier chapitre empirique où l'objectif est d'analyser une politique environnementale, non pas orientée sur l'offre mais sur la demande. Au sein de l'Union Européenne, la production sidérurgique est soumise au marché de quotas d'émissions de CO₂. Cette politique peut ainsi encourager les sidérurgistes à utiliser davantage de matières premières secondaires. Extrêmement intensive en matière et en énergie, la production d'acier est responsable d'environ 7% des émissions totales de CO₂. Lorsque le transport et l'extraction minière sont pris en compte, cette part s'élève à environ 10% (IEA, 2007). A l'échelle de l'Union Européenne, il représente 27% des émissions de CO₂ du secteur industriel. La grande majorité de ces émissions est issue de la filière primaire dont la production est basée sur la consommation de minerai de fer et de charbon à coke, contrairement à la filière secondaire dont la production repose sur la matière première secondaire. Concernant la filière primaire, il s'avère qu'une seule firme domine le marché avec en moyenne 35% de parts de marché sur les 10 dernières années. Ainsi, nous nous penchons sur l'effet du marché du carbone, non seulement sur les émissions de la filière sidérurgique, mais également au niveau de son impact en terme d'organisation industrielle.

5 La structure de la thèse

Le premier chapitre de cette thèse présente les marchés mondial du fer et de l'acier sous un angle historique. L'objectif est d'étudier l'évolution de la structure de marché suite au choc de demande du début des années 2000. L'arrivée de la Chine en tant que principal consommateur et producteur d'acier a en effet profondément

bouleversé le secteur. Les firmes minières se sont donc adaptées à ce nouveau contexte qui leur est *a priori* bénéfique, mais l'appartenance des principales firmes sidérurgistes aux autorités chinoises ajoute une dimension stratégique à ce choc de demande. Ce chapitre met ainsi en évidence l'existence d'une structure de marché peu étudiée dans la littérature : le monopsonne contrarié.

Le deuxième chapitre est théorique. Nous reprenons une structure de marché plus traditionnelle dans laquelle un oligopole minier est confronté à la concurrence d'une frange concurrentielle de recycleurs. L'objectif principal est d'analyser les ressorts industriels d'une telle concurrence tant au niveau des parts de marché qu'au niveau de la rente minière dont bénéficient les entreprises d'extraction. Les nouvelles hypothèses que nous prenons dans le cadre de notre modèle *leader(s)-followers*, diffèrent de celles de la littérature et se rapprochent davantage des conditions réelles de l'offre de matières premières. Ainsi, l'amplitude de la variation des parts de marché et de la rente minière varie notamment en fonction de la technologie de recyclage, de la disponibilité de déchets ou encore du degré de concurrence du secteur minier. En parallèle, nous analysons dans quelle mesure les recycleurs peuvent entrer sur le marché et quelles sont les implications stratégiques pour les entreprises minières.

Le troisième chapitre étend l'analyse en tenant compte de l'existence d'un différentiel d'externalités environnementales entre les deux concurrents. En effet, l'intérêt du recyclage ne réside pas uniquement dans sa faculté potentielle à faire diminuer le prix de marché, mais il permet également d'améliorer la durabilité de l'offre de matières premières. A cet égard, en plus d'étudier dans quelle mesure le bien-être est modifié en présence du recyclage et d'externalités environnementales, l'objectif de ce chapitre consiste à analyser l'introduction d'une taxe sur la production minière et d'une subvention au recyclage. La littérature existante est relativement peu abondante alors que les enjeux sont grandissants. Pour illustrer notre approche théorique, nous calibrons notre modèle avec des données issues des marchés du fer et de l'acier de plusieurs pays. Ainsi, plusieurs situations de recyclage sont représentées. Les effets des politiques publiques sur les parts de

marché et sur l’empreinte environnementale de l’offre de matières premières, sont donc mesurés et mettent en avant les avantages significatifs qu’auraient une subvention au recyclage, en comparaison d’une taxe basée sur les émissions de CO₂ de l’activité minière.

Enfin, dans le quatrième chapitre, nous adoptons une approche empirique visant à étudier une politique publique environnementale appliquée à la demande de matières premières. En l’occurrence, nous évaluons l’impact du marché du carbone sur l’intensité CO₂ des sites sidérurgiques au sein de l’Union Européenne, et notamment le changement de méthodologie qui s’est produit en 2012 et censé refléter une meilleure allocation des quotas. Au regard de la structure de marché de la sidérurgie européenne, l’ensemble des données collectées nous amènent également à observer un *trade-off* entre la politique climatique européenne et la politique de concurrence.

Chapitre I

**Les marchés mondial du fer et de l'acier :
du choc de demande des années 2000 à
l'émergence d'un monopsonne contrarié**

Résumé

Pour faire face à l'urbanisation croissante et aux besoins gigantesques de son industrie au début des années 2000, la Chine a créé un véritable choc de demande sur les marchés du fer et de l'acier. Ce chapitre analyse les conséquences de ce choc sur l'ensemble du secteur au niveau mondial, et met en avant l'évolution de la structure de marché. Durant des décennies, le prix du minerai de fer résulte d'une négociation de gré à gré au sein d'un oligopole bilatéral composé des principaux sidérurgistes et des entreprises minières. Au cours des années 2000, le mode de fixation du prix change pour mieux refléter les nouvelles conditions de marché et intégrer de nouveaux acteurs. Ainsi, en contrôlant une grande partie des sidérurgistes et au regard d'une demande aussi forte, les autorités chinoises ont fait basculer le marché mondial d'un oligopole à un monopsonne contrarié.

Mots clés : oligopole, monopsonne, sidérurgie, minerai de fer

1 Introduction

A l'instar de nombreux secteurs industriels, la filière sidérurgique a connu de réelles mutations sur le plan mondial. L'éclatement du bloc soviétique, la croissance fulgurante de la Chine et l'avènement des autres pays en transition (ou pays en développement, dits « PED ») ont profondément modifié les rapports de force au sein de l'Union Européenne d'une part et entre les pays du Sud et du Nord d'autre part.

En tant qu'économie émergente, la Chine a considérablement augmenté sa demande de matières premières et sa production d'acier, notamment pour construire les infrastructures et alimenter l'activité industrielle qui représente aujourd'hui environ 45% du Produit Intérieur Brut (PIB) chinois, contre 24.8% en Union Européenne. Cet accroissement de la demande de matières premières des PED a eu des répercussions importantes sur les pays industrialisés. Hausse de la volatilité des prix des matières premières, accroissement de la concurrence sont quelques effets qui sont apparus progressivement depuis les années 90 et qui se poursuivent encore aujourd'hui. Aux marges de l'Union Européenne, l'éclatement de l'Union soviétique a fait émerger de nouveaux marchés. Synonyme de potentielle croissance pour les Pays d'Europe Centrale et Orientale (PECO), ces marchés représentent également des opportunités pour les entreprises des pays développés. Au même titre que pour les pays émergents au niveau mondial, ces nouveaux débouchés ont donc eu des répercussions importantes sur les économies traditionnelles. Sur le « vieux continent », l'impact a été amplifié par le processus d'intégration dans l'Union Européenne avec la libre circulation des capitaux, des personnes, des biens et des services. L'ouverture de nouveaux marchés, autant européens qu'internationaux, constitue de nouvelles sources potentielles de croissance tout en laissant place à une concurrence entre les firmes déjà implantées et les nouveaux entrants. Ces mutations économiques qui s'opèrent depuis les vingt dernières années ont été facilitées par le développement du commerce international. Des interdépendances se sont ainsi formées, parfois pour le meilleur, mais aussi parfois pour le pire comme

en atteste la crise financière de 2008 et ses répercussions économiques mondiales.

Afin d'illustrer ce (très) bref constat macroéconomique, nous nous penchons dans le cadre de ce premier chapitre - et de la thèse en général - sur le marché du fer et de l'acier, notamment au regard de son rôle stratégique dans la croissance d'un pays ou d'une région. En effet, la filière s'avère être d'une importance capitale pour d'autres secteurs comme celui des infrastructures de transport, du bâtiment, de la construction automobile ou encore de l'industrie mécanique. Ces secteurs sont d'autant plus importants qu'ils représentent l'ossature d'une économie dans son ensemble car le développement passe nécessairement par la construction d'infrastructures, de moyens de transport et autres outils nécessaires à la production industrielle. La filière sidérurgique peut également être sollicitée dans des secteurs dont la consommation d'acier en volume est moins importante, comme par exemple l'industrie énergétique, la pétrochimie ou dans une moindre mesure, l'aéronautique. L'acier est le métal le plus courant dans la vie quotidienne. Il est également le métal le plus utilisé au monde avec une consommation en tonnage représentant plus de 95% de tous les métaux produits mondialement (Faure, 2012). Dans son ensemble, la filière regroupe à la fois de grands groupes internationaux, engagés dans la production sidérurgique et/ou l'extraction de minerai, et un grand nombre d'acteurs locaux, spécialisés notamment dans la récupération de ferrailles (produits en fin de vie contenant de l'acier).

La sidérurgie, où la technique de transformation du minerai de fer en fonte ou en acier, est apparue sous cette appellation au 18^{ème} siècle pour la distinguer du secteur de la métallurgie plus diversifié qui comprend en outre l'ensemble des « non-ferreux », cuivre, aluminium, étain, zinc, plomb, etc. (Eluerd, 1993). Au fil des siècles, la filière a évolué au même rythme que la révolution industrielle occidentale et a connu un tournant majeur au début des années 2000 avec l'arrivée de la Chine sur la scène internationale et l'explosion de la demande mondiale. L'objectif de ce chapitre consiste à présenter les implications de ce choc de demande sur l'ensemble de la filière. Une analyse qui met ainsi en lumière les différentes

structures de marché qui se sont succédées dans le secteur du fer et de l'acier. L'analyse économique apporte de nombreuses éclaircies relatives au fonctionnement des marchés et au comportement des entreprises lorsqu'elles disposent d'un potentiel pouvoir de marché, ce qui semble être le cas en amont de la filière, pour les acteurs de l'extraction.

Pour comprendre les aspects historiques de la sidérurgie et les enjeux stratégiques actuels, la Section 2 retrace l'évolution du secteur, de son dynamisme caractéristique de l'avant choc pétrolier aux années 2000, véritable tournant pour toute la filière. Né du développement économique de la Chine, le choc de la demande du début du 21^{ème} siècle est relaté dans la Section 3. Enfin, notre Section 4 montre l'impact de la demande chinoise en amont de la filière, sur le marché du minerai de fer. La Section 5 conclut.

2 La filière sidérurgique : de la régionalisation à la mondialisation des rapports économiques pendant la seconde moitié du 20^{ème} siècle

Même si l'appellation de « sidérurgie » est née au 18^{ème} siècle, le travail du fer, notamment sous sa forme artisanale, remonte à l'Antiquité puis s'est développé au Moyen-Âge à des degrés divers selon les régions. C'est au cours du 19^{ème} siècle qu'apparaissent les innovations les plus marquantes. Elles sont surtout le fruit de la révolution industrielle : la sidérurgie moderne est née. Tout au long du 20^{ème} siècle, la filière montre toute son importance pour structurer les économies, tant les usages qui en sont faits sont nombreux et nécessaires, en particulier dans l'armement et les infrastructures. En amont de la filière, l'extraction du minerai comme principale input au développement de la sidérurgie, suit la cyclicité de l'activité. Des Trente Glorieuses aux multiples crises des dernières décennies du 20^{ème} siècle, les entreprises minières se sont donc adaptées à la demande d'acier

des pays industrialisés, moteur de la croissance mondiale.

2.1 Du développement d'une sidérurgie régionale à l'émergence d'une concurrence internationale

Les deux grandes guerres érigent la production d'acier comme un marqueur important de la puissance militaire des pays. L'Allemagne, la France, la Grande Bretagne, le Japon et les Etats-Unis notamment, multiplient les investissements dans ce secteur et permettent à la sidérurgie de s'amorcer véritablement avant son développement continu les trois décennies suivantes. L'abondance de l'énergie et le développement de nouveaux procédés (*e.g.* injection d'oxygène pur) permet d'accroître de manière brutale les performances des unités sidérurgiques¹. En parallèle, le développement des échanges internationaux a des répercussions importantes sur les économies industrialisées qui éprouvent donc des difficultés à consolider leur filière sidérurgique respective.

En Europe, la Communauté Européenne du Charbon et de l'Acier (CECA) et les premiers pas du marché commun

Durant les Trente Glorieuses, la demande d'acier est très forte. Elle est à la mesure des besoins d'un continent dont les infrastructures et les bâtiments ont été dévastés par six ans de guerre. Certains hommes politiques, comprenant que le charbon et l'acier constituent à eux deux des enjeux majeurs pour la reconstruction de l'Europe, œuvrent donc pour une mise en commun des moyens de production de ces deux secteurs. C'est la naissance de la Communauté Européenne du Charbon et de l'Acier (CECA) rassemblant, hors Royaume-Uni, les six pays industriels du continent : la République Fédérale d'Allemagne (RFA), la Belgique, la France, l'Italie, le Luxembourg et les Pays-Bas.

Ainsi, comme stipulé dans le traité de Paris en 1951, « les institutions doivent veiller à l'approvisionnement régulier du marché commun en assurant un égal

¹En Annexe I.A, nous présentons de manière simplifiée les technologies de production de l'acier ainsi qu'une typologie des principaux produits sidérurgiques.

accès aux sources de production, en veillant à l'établissement des prix plus bas et à l'amélioration des conditions pour la main-d'œuvre. Tout cela doit être accompagné du développement des échanges internationaux et de la modernisation de la production. En vue de l'instauration du marché commun, le traité instaure la libre circulation des produits. Il interdit les mesures ou pratiques discriminatoires, les subventions, les aides ou les charges spéciales de l'État ainsi que les pratiques restrictives ». En plus des enjeux économiques, la création de la CECA revêt également d'une dimension politique. Comme l'affirme Jean Monnet, « notre communauté n'est pas une association de producteurs de charbon et d'acier, c'est le début de l'Europe » (Monnet, 1976). En 1952, le traité CECA entre ainsi en vigueur, et avec lui, le marché commun de la sidérurgie sur le territoire européen. Au-delà des enjeux énergétiques dont le charbon est le fer de lance en cette période d'après-guerre, le tonnage annuel d'acier produit est perçu dans les années 50 comme le symbole de puissance d'un pays. Un rapport d'évaluation de la Commission Européenne nuance toutefois l'importance du rôle de la CECA (Mioche, 2004). Bien que l'ouverture du marché entre les six a permis de développer les échanges commerciaux intra-européens, et le secteur de l'acier a fait figure de précurseur, le marché et les technologies ont également joué un rôle prépondérant de l'après-guerre à la fin du 20^{ème} siècle. Les nombreuses innovations dans le processus de production et le développement des importations d'un minerai de fer peu coûteux en provenance d'Afrique et d'Amérique du sud, ont participé à l'amélioration de la productivité et indirectement à la baisse des coûts de production.

A partir des années 70, la donne s'inverse subitement et la sidérurgie européenne fait face à une chute de la demande d'acier entraînant un phénomène d'offre excédentaire et donc de surcapacités. Malgré quelques variations selon les produits sidérurgiques, on assiste globalement à une chute de la production d'un tiers et une baisse des prix de l'ordre de 40% en 1974 (Tarr, 1988). Plusieurs facteurs coïncident pour justifier cette crise telle que la hausse de la concurrence des autres matériaux comme le béton et l'aluminium, mais aussi et surtout, l'aug-

mentation de la concurrence internationale, en particulier japonaise. Bien que les situations soient différentes selon les pays, la sidérurgie européenne ne parvient globalement pas à se relever et ce qui fut la fierté du continent pendant les Trente Glorieuses, est désormais le symbole d'une crise industrielle dont les dégâts sur l'emploi sont considérables et encore visibles aujourd'hui dans certaines régions. En 1980, le taux d'utilisation des capacités de production monte péniblement à 50% et il semble difficile de gagner de l'argent en produisant de l'acier. Cette crise structurelle gagne par ailleurs l'ensemble des pays développés pendant plus d'une décennie, où chaque entreprise sidérurgique échoue à faire les ajustements nécessaires pour retrouver une viabilité financière (Denham, 1983). Les surcapacités sont importantes et la Commission – la CECA étant désormais intégrée à la Communauté Economique Européenne – ainsi que les Etats membres décident alors d'agir chacun de leur côté pour tenter d'enrayer cette chute inexorable.

Pendant plusieurs années, les plans de restructuration se succèdent, un système de quotas de production est mis en place dans le marché commun et des aides d'Etat sont accordées pour accompagner la fermeture des sites. Au début des années 90, le taux d'utilisation remonte à 70% et les mesures de soutien de la Commission prennent fin au milieu des années 90 où une nouvelle crise amène cette institution européenne à intervenir de nouveau. Cette fois, les mesures d'accompagnement à la restructuration sont conditionnées par l'arrêt des subventions publiques. La voie de la privatisation de la sidérurgie européenne est implicitement ouverte. Derrière cette politique sectorielle menée par la Commission, il y a surtout la volonté de ne plus faire cohabiter les entreprises privées et publiques, et, avec l'Acte Unique en toile de fond en 1986, faire de l'Europe un vaste marché domestique concurrentiel. A l'aube des années 2000, la situation de la sidérurgie est stabilisée et la quasi-totalité de son industrie est privatisée. Une grande partie de ces groupes s'internationalise et ont progressivement recours à des fusions/acquisitions pour se renforcer. La concentration du marché européen est en marche, comme le montre la Figure I.1.

Cette situation est d'autant plus surprenante que la CECA, puis la Commission

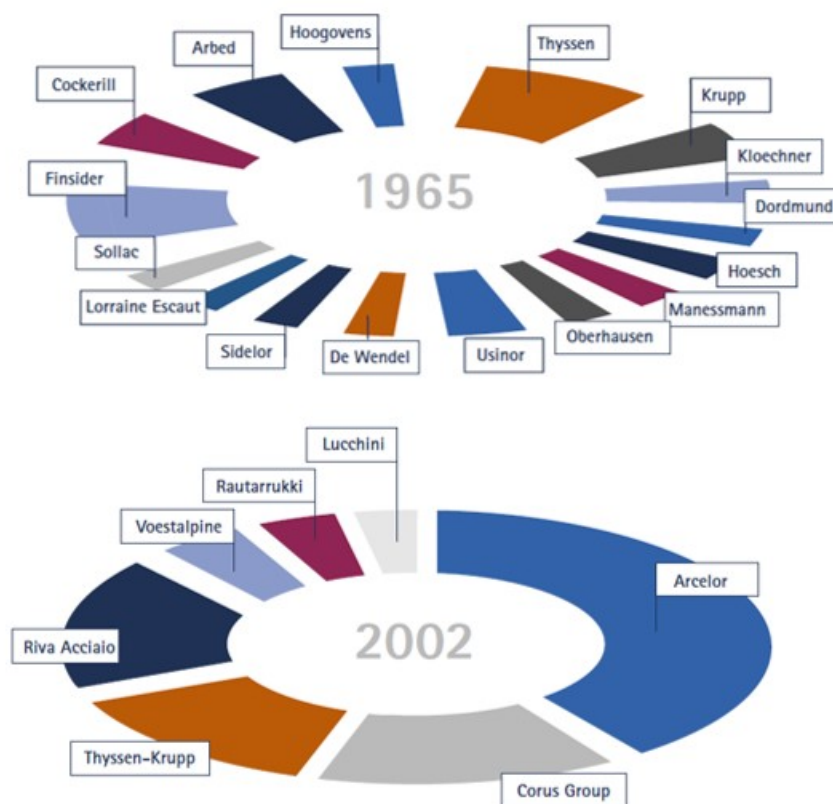


FIGURE I.1 – Evolution des parts de marché des entreprises sidérurgiques européennes entre 1965 et 2002 (source : Mioche (2004))

Européenne par la suite, était très vigilante à de telles pratiques afin de favoriser la concurrence au sein du marché commun. Par ailleurs, dès l'après-guerre, la volonté politique était pourtant bel et bien d'éviter le retour des *konzerns*² allemands. Véritable source d'inquiétude pour les Français, les Allemands voyaient au contraire dans cette concentration une nécessité économique. Bien que les ententes étaient dès la création de la CECA totalement proscrites, en réalité les entreprises et/ou les Etats s'affranchissaient de ces règles et les ententes sur les prix au niveau national étaient monnaie courante. L'objectif était surtout de se prémunir contre la cyclicité de l'activité sidérurgique. Quand la demande diminue, les entreprises se retrouvent rapidement en difficulté car il y a d'importants coûts fixes qu'il est

²Terme allemand qui désigne une association d'entreprises aussi bien sur le plan vertical que sur le plan horizontal.

nécessaire de couvrir. En plus d'un rapide gonflement des stocks, les sidérurgistes doivent en effet faire face à une chute générale du prix de l'acier où chaque dirigeant d'entreprise cherche à gagner des parts de marché en baissant son prix de vente. C'est donc pour faire face à cette dangereuse surenchère mais également dans le but d'affronter une concurrence internationale qui peu à peu s'exacerbe, que les sidérurgistes pratiquent les ententes et à terme, se concentrent. La cyclicité de l'activité peut notamment s'illustrer à travers la production sidérurgique européenne depuis les années 80 (*c.f.* Figure I.2).

Les Etats-Unis et le Japon, acteurs majeurs de la sidérurgie mondiale

La naissance de deux puissantes industries

Construire des infrastructures routières et/ou ferroviaires et développer l'outil industriel (*e.g.* armement, automobile) sont les deux piliers pour le lancement d'une offre sidérurgique conséquente. Bien qu'elles soient liées, les filières sidérurgiques américaine et japonaise n'ont toutefois pas la même histoire et ne se développent pas sur la même période. Dès le début du 20^{ème} siècle, les Etats-Unis deviennent le premier producteur mondial d'acier avec 10.3 Mt. La croissance de la production entre 1870 et 1913 est de 7%, contre 1% au Royaume-Uni, 6% en Allemagne et environ 4% en France et en Russie. Une croissance aussi fulgurante est notamment le fruit de secteurs consommateurs d'acier très dynamiques, d'un vaste marché intérieur, d'un accès aux matières premières facilité et d'une politique tarifaire protectionniste. En 1930, avec 41.3 Mt les Etats-Unis produisent près de quatre fois plus d'acier que l'Allemagne, alors deuxième producteur mondial. La crise des années 30 a toutefois un impact important et les Etats-Unis voient ainsi leur production d'acier diminuer de près de 31% alors que l'Allemagne l'augmente de plus de 200% (Kennedy, 1987) ! La période de guerre suivie des Trente Glorieuses permettent aux Etats-Unis de relancer la filière, notamment grâce à une politique publique de l'époque sous une forte influence keynésienne. Développement de nouvelles technologies et accroissement des économies d'échelle permettent aux

acteurs de la sidérurgie d'augmenter leur productivité jusqu'à la crise des années 70. En plus des privatisations d'entreprises, Kim *et al.* (2006) confirment dans une étude empirique menée sur plus de 50 entreprises dans 23 pays, que les économies d'échelle et les améliorations technologiques sont des déterminants primordiaux pour favoriser l'efficacité productive dans un secteur aussi intense en capital.

Au Japon, la filière sidérurgique met davantage de temps à se créer que dans les pays occidentaux. Non seulement l'accès aux matières premières est plus difficile mais la faible taille du marché domestique ne permet pas aux acteurs de développer des outils de production rentables. En 1920, le Japon ne produit qu'à peine 840 mt mais parvient en l'espace de dix ans à multiplier sa production par 273%, soit 2.3 Mt en 1930. Cette croissance fulgurante s'accélère encore jusqu'en 1938 avec une production s'élevant à 7 Mt, soit en hausse de plus de 300% ! En volume et en comparaison avec les autres pays juste avant la seconde guerre mondiale, le Japon est le cinquième producteur devant la France (6.1 Mt), mais toujours derrière les Etats-Unis (28.8 Mt), l'Allemagne (23.2 Mt), la Russie (18 Mt) et le Royaume-Uni (10.5 Mt). En revanche quelques années plus tard, le pays sort très affaibli d'une guerre dont le point final pour les japonais fut marqué par les deux bombes atomiques larguées sur Hiroshima et Nagasaki. De nombreux sites sidérurgiques sont inopérants et la reconstruction est naturellement érigée comme objectif prioritaire du gouvernement japonais. Une nouvelle orientation est toutefois donnée à la filière. Il s'agit désormais non pas de fournir des biens et équipements destinés au secteur de l'armement, comme aurait pu le laisser présager l'éclatement de la guerre de Corée en 1950, mais bien d'alimenter l'économie en biens de consommation et infrastructures modernes. Cette orientation est par ailleurs vivement encouragée par les Etats-Unis et quelques pays européens dont les acteurs sidérurgiques participèrent aux transferts de technologie, et donc à la modernisation de la sidérurgie japonaise. En 1951, le premier site entièrement intégré et proche du littoral naît à l'initiative de Kawasaki Steel Corporation (Ohashi, 1992). Inspiré des technologies européennes et surtout américaines, ce site est considéré comme le modèle pour

une future sidérurgie japonaise qui atteint son pic de production vingt-deux ans plus tard en 1973 avec 119 Mt, contre 62 Mt en 1967 (+92% en six ans). L'expansion rapide de la filière permet au Japon d'être à cette date le second pays producteur d'acier derrière les Etats-Unis avec 136 Mt. Cette hiérarchie dans la production sidérurgique mondiale reste identique même après le passage de la crise des années 70.

Le changement de contexte post 1970's

A l'aube du premier choc pétrolier, le paysage sidérurgique est marqué par une croissance très forte et donc, une concurrence qui s'exacerbe de plus en plus. Les années 1973-1974 sont très encourageantes pour la sidérurgie mondiale et les prévisions pour la décennie suivante sont optimistes selon la plupart des prévisionnistes et experts du secteur. Tout comme en Europe, les Etats-Unis, et dans une moindre mesure le Japon ³, se lancent dans des programmes d'investissement visant à augmenter les capacités de production et bénéficier d'économies d'échelle. Un optimisme rapidement éteint à la fin des années 70 où de nombreuses entreprises font face à des pertes importantes. A la baisse de la demande générale d'acier aux Etats-Unis (-36 Mt entre 1973 et 1984) et en Europe (-33 Mt sur la même période) s'ajoute la concurrence internationale et notamment des sidérurgistes japonais, puis par la suite coréens et brésiliens. La production sidérurgique américaine passe ainsi de 132 Mt en 1974 à 84 Mt en 1984, soit une diminution d'environ 37%. La crise pétrolière qui frappe l'économie mondiale n'est donc pas l'unique responsable de ce contexte moribond où les surcapacités sont criantes. Structurellement, les économies développées s'orientent progressivement vers un nouveau modèle de développement où la part des secteurs de la construction et de l'industrie tend à diminuer au profit du secteur des services, dans un contexte où la concurrence internationale s'exacerbe. Une tendance de fond qui renforce

³L'utilisation des capacités de production des sidérurgistes japonais étaient de seulement 65% durant la décennie 1965-1975 (Steel Industry : quaterly industry review, (Bradford, 1980)). Les besoins en augmentation de capacité étaient donc inférieurs à ceux des concurrents européens et américains.

le besoin de compétitivité des sidérurgistes à l'heure où le commerce mondial se développe. Pour affronter ce nouveau contexte, les japonais sont les mieux armés avec des coûts inférieurs d'environ 60% par rapport aux sidérurgistes américains à la fin des années 70 (Tarr, 1988).

A l'instar des sidérurgistes européens, les entreprises américaines peuvent toutefois compter sur l'intervention des pouvoirs publics pour limiter les dommages. Tout en les jugeant « complaisantes » et « inéquitables » car anti-concurrentielles, Duke *et al.* (1977) évaluent les politiques publiques mises en place par les autorités étrangères et effectuent des propositions à destination du gouvernement américain. Ainsi, certaines mesures de protection supplémentaires comme les quotas d'importation, s'ajoutent donc à celles existantes ⁴. En 1978 se décide l'instauration d'un mécanisme de prix minimum des importations, qui, d'après les estimations de Crandall (1981), firent augmenter les prix d'imports d'environ 9% essentiellement en provenance d'Europe et du Japon. Outre les impacts directs de court terme sur la filière, ces mesures prises par les autorités américaines ont également pour objectif de donner l'opportunité aux sidérurgistes de moderniser leur outil de production et améliorer leur compétitivité face aux concurrents internationaux. Or, sur ce point, très peu d'acteurs saisissent l'occasion. La demande est toujours aussi faible et les coûts salariaux sont toujours aussi élevés. Durant les années 80-90, la concurrence internationale se renforce de nouveau avec l'apparition de nouveaux acteurs en provenance des pays émergents, en particulier du Brésil et de la Corée du Sud. Le Tableau I.1 donne une comparaison des différents coûts (en US\$) d'une tonne de produits sidérurgiques exportée en 1984 (Walter et Mueller, 1986) ⁵ :

Entre 1980 et 1982 la production sidérurgique américaine chute ainsi de 33% et présente un taux de croissance annuel moyen en baisse de 1.3% de 1980 à 1990. Parallèlement, la filière électrique prend de l'importance au détriment des filières traditionnelles. Grâce à une meilleure flexibilité de production, un faible coût des

⁴Il existe par ailleurs une littérature assez dense concernant l'histoire de la sidérurgie américaine, ses évolutions et le rôle joué par les politiques publiques (Mueller (1984) ; Preston (1992) ; Tornell (1997) ; Rogers (2009))

⁵Les productions brésilienne et coréenne ont une proportion de produits moins « sophistiqués » plus forte, ce qui explique, en partie, des coûts moins élevés.

TABLE I.1 – Comparaison internationale des coûts des principaux inputs en 1984

	Travail	Coke et Fer	Energie	Capital	Total	% de différence de coût par rapport aux US
Etats-Unis	170	102	76	55	403	0
Comm.Eur. (7)	97	102	48	67	314	78%
Japon	82	97	46	77	302	75%
Brésil	44	86	50	114	296	74%
Corée du Sud	24	97	48	85	256	64%

inputs et des coûts énergétiques plus faibles que les unités oxygènes traditionnelles (Barnett et Crandall (1986) ; Crandall (1996)), la production sidérurgique de cette filière passe de 19% en 1974 à 45% en 1999. Une fin de 20^{ème} siècle difficile pour la sidérurgie américaine où seule la filière électrique tire finalement profit grâce à ses caractéristiques intrinsèques susmentionnées et à une recherche d'innovation continue.

Au Japon, le rattrapage de la production sidérurgique sur ses concurrents est au départ quantitatif, puis par la suite qualitatif. Ainsi, Libermann et Johnson (1999) font apparaître une meilleure productivité du travail des unités sidérurgiques japonaises dès la fin des années 60, notamment grâce à des investissements plus importants sur le facteur travail. A dominante privée, la filière s'inspire des technologies existantes et les perfectionne pour les adapter sur des secteurs porteurs comme la pétrochimie et la construction navale notamment. Néanmoins, la crise née du choc pétrolier frappe également les sidérurgistes japonais et le rythme de croissance chute brutalement à partir de 1974 en passant d'environ 13% par an de 1960 à 1973 à presque 0% de 1974 à 1982 (CEPII, 1982). Pour y faire face, une partie des sidérurgistes monte en gamme. Cette évolution vers des produits à plus forte valeur ajoutée s'accélère dès le milieu des années 70. Nécessitant le développement de nouvelles technologies, cette montée en gamme réduit par la même occasion l'utilisation de matières premières. Au début des années 80, la

reprise de la consommation sur le marché intérieur permet aux sidérurgistes de compenser le recul des exportations. Cette période tumultueuse pour les acteurs mondiaux de la sidérurgie n'est pas aussi pénalisante pour les Japonais. A titre d'exemple, en 1980, 50% de l'outil de production a moins de 10 ans aux Etats-Unis contre plus de 80% au Japon (CEPII, 1982). En dépit d'une baisse du taux des capacités d'utilisation, les sidérurgistes japonais maintiennent également un niveau de dépense d'innovation nettement supérieur à leurs concurrents étrangers. Augmentation du volume des fourneaux, amélioration des procédés de contrôle du laminage, utilisation de matières premières de meilleure qualité, représentent quelques avancées technologiques qui leurs permettent d'améliorer la productivité et donc leur compétitivité. En ajoutant des efforts sur les coûts, notamment énergétiques, et des démarches d'internationalisation *via* des rachats d'entreprises, en particulier américaines, les sidérurgistes japonais se renforcent sur la scène internationale jusqu'à la fin des années 90. Malgré la hausse du Yen et l'éclatement des bulles financière et immobilière qui secouèrent le pays pendant la décennie 90, les sidérurgistes japonais sont parvenus à maintenir une production fluctuant très légèrement autour de 100 Mt, comme le montre la Figure I.2 (source des données : World Steel Association).

Sur le plan international, la situation reste cependant assez figée. On observe une stabilité de la production sidérurgique ainsi qu'une stabilité des prix. Un quasi statut quo règne au début des années 2000 avant l'arrivée des pays émergents sur la scène internationale, en particulier la Chine.

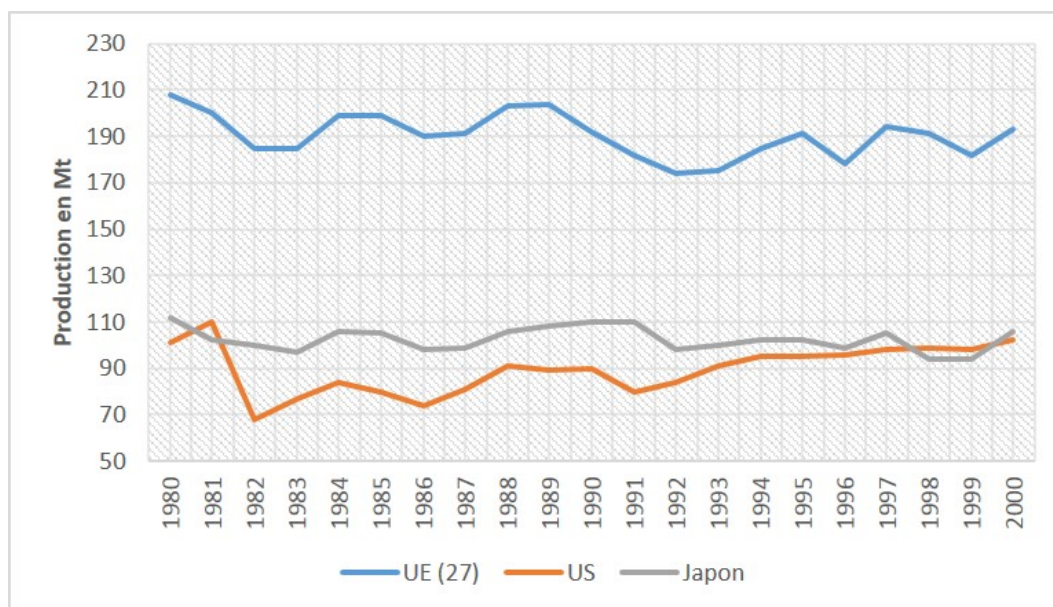


FIGURE I.2 – Production sidérurgique de l’UE(27), des Etats-Unis et du Japon entre 1980 et 2000

L’industrie sidérurgique chinoise : moteur d’une économie émergente

Durant le 19^{ème} siècle, suite à plusieurs conflits avec le Japon et certains pays européens, la dynastie Qing se trouve confrontée à une guerre « moderne » et reconnaît l’importance de la maîtrise du fer et de l’acier à une plus large échelle. En 1893, le premier complexe dédié à la production de fer et d’acier s’achève. Les deux guerres mondiales et la guerre civile chinoise du 20^{ème} siècle ne permettent cependant pas de poursuivre la modernisation de l’industrie sidérurgique. Suite à une première moitié de siècle marquée par les guerres, le parti communiste chinois prend le pouvoir en 1949 et instaure la République Populaire de Chine, encore dénommée ainsi aujourd’hui. Menée par Mao Zedong, l’économie chinoise se lance progressivement vers la production industrielle planifiée, à l’image de son voisin soviétique à qui un soutien technique est demandé. Mettre l’acier au cœur du développement économique est également pour les dirigeants chinois de l’époque un moyen de créer une puissance militaire. Jusqu’en 1978, en raison de nombreux facteurs économiques, politiques et techniques, la mise en œuvre et la croissance de l’industrie sidérurgique chinoise prend du temps (Sugimoto, 1993). En 1978, la

productivité globale des facteurs est d'ailleurs toujours sous son niveau de 1957 et il faut attendre quelques années pour que la politique de réformes et de modernisation de l'économie chinoise, lancée par le nouveau numéro un de la République Populaire de Chine, Deng Xiaoping, fasse effet. En 1985, le niveau de productivité globale des facteurs franchit enfin un seuil et dépasse les pics de 1970 et 1972 (Jefferson, 1990). En un peu plus d'une décennie, la Chine investit 150.6 milliards de Yuan (soit 22 milliards d'Euros 2015) dans l'industrie sidérurgique, faisant quintupler la valeur de ses actifs de 1978 à 1992 (Feng, 1995). Les entreprises sidérurgiques, toujours sous contrôle étatique, se voient notamment définir le profit comme objectif. Elles peuvent désormais bénéficier de plus de souplesse dans leur gestion, donner plus de responsabilités aux managers ou encore permettre aux employés de bénéficier de la croissance de leur entreprise (*e.g.* : passage d'un salaire annuel de 500 Yuan en 1978 à 3 800 Yuan en 1992, soit un passage de 73 à 568 Euros 2015) (Sugimoto (1993) ; Song et Liu (2012)). En termes de financement, les entreprises sidérurgiques ont l'opportunité de lever des fonds *via* des prêts octroyés par les banques, des capitaux étrangers ou encore *via* l'autofinancement. Au début des années 90, le gouvernement central met un terme à l'approvisionnement planifié et au contrôle de la production et des prix. L'autonomie progressive des entreprises réveille ainsi le secteur sidérurgique qui n'hésite plus à utiliser du capital étranger afin d'améliorer des technologies très obsolètes et compenser la faiblesse de l'approvisionnement en matières premières par des importations (multiplication par huit des importations de minerai entre 1978 et 2000). Gestion autonome et progrès technologique sont deux déterminants majeurs du progrès de l'industrie sidérurgique chinoise. En parallèle, le pays ouvre progressivement ses frontières favorisant notamment les transferts de technologie ou les apports de capitaux. Limitée à quelques zones littorales et proches de Macao et Hong-Kong au départ, l'ouverture aux capitaux étrangers s'est étendue progressivement dans les villes jusqu'à la fin des années 90. Le phénomène sous-jacent à ce basculement est le passage d'une filière intensive en facteur travail à une filière intensive en facteur capital. Ceci, afin d'engager des économies d'échelle et améliorer la productivité

de l'industrie sidérurgique chinoise. Au début des années 90, la Chine atteint un pic d'employés dans la sidérurgie avec 3.2 millions de travailleurs, puis ce chiffre tombe à 2.9 millions en 1998 et 2.5 millions en 2000 (Movshuk, 2003). Les années suivantes, le nombre d'employés évolue avec la hausse de la production mais dans des proportions moindres. En 2010, environ 3.5 millions de personnes travaillent pour la sidérurgie (Changfu, 2012). C'est seulement 9% de plus qu'en 1990 pour une production qui a augmenté d'environ 950% !

Bien que les données historiques sur l'industrie chinoise soient peu nombreuses et peu fiables, notamment avant les années 80, les articles de Kuan *et al.* (1988), Jefferson (1990), Wu (1995), Ma *et al.* (2002) ou encore Movshuk (2003) tentent de caractériser empiriquement l'industrie sidérurgique chinoise post-1980, en évaluant les gains de productivité liés aux plans de réforme lancés successivement par les autorités. Alors que certains résultats divergent sur les déterminants de la productivité des sites sidérurgiques ⁶, ils sont en revanche unanimes sur l'hétérogénéité des acteurs et la forte influence des pouvoirs publics dans la filière. Le paysage sidérurgique chinois est en effet marqué par de nombreuses entreprises de petites tailles et implantées localement sous la responsabilité des autorités de proximité. Elles évoluent conjointement avec des *State Owned Enterprises* (SOE). En Chine, les SOE sont des entreprises gérées au sein d'une économie de marché mais dont les capitaux sont à majorité détenus par le gouvernement central, et plus précisément par la *State-owned Assets Supervision and Administration Commission* (SASAC). Elles se sont construites à travers des fusions et acquisitions en aval et en amont de la filière pour pouvoir importer du minerai et vendre des produits finis en priorité sur le marché domestique. En deux décennies, une véritable révolution s'est opérée pour la filière sidérurgique et plus globalement pour l'économie chinoise. L'impact de cette révolution politico économique reste toutefois limitée sur les marchés mondiaux jusqu'à la fin des années 90. Au moins symbolique, probablement nécessaire

⁶A la différence de Jefferson (1990) et Ma *et al.* (2002), Wu (1995) n'estime pas que des économies d'échelle ont été réalisées ni que les entreprises gérées localement soient plus productives que les entreprises gérées par l'autorité centrale.

et souhaitable pour les autorités, l'accès de la Chine à l'Organisation Mondiale du Commerce (OMC) en 2001 raisonne alors comme une nouvelle étape dans son développement économique et un nouveau défi pour les sidérurgistes des pays industrialisés.

2.2 La stabilité des rapports entre entreprises minières et sidérurgistes et le rôle du transport maritime dans la mondialisation du marché

La sidérurgie mondiale consomme plus de 95% du minerai de fer. Ce taux démontre à lui seul le niveau de dépendance des entreprises minières. Au cours du 20^{ème} siècle, les quantités d'acier nécessaires à l'économie sont relativement prévisibles malgré quelques épisodes conjoncturels pouvant affecter les secteurs demandeurs d'acier comme le marché automobile ou la construction. Structurellement, on peut en effet distinguer une période de forte croissance mondiale de la production d'acier après la seconde guerre mondiale et jusqu'au choc pétrolier (1950-1973 : 5.8% de croissance par an (BCG, 2007)), puis enfin une seconde période marquée par un net ralentissement et une stabilité de la croissance de la production d'acier à environ 0.6% par an de 1974 à 2000. Compte tenu du poids important de l'investissement, en particulier l'achat de la concession minière à l'autorité publique, et du délai nécessaire entre le lancement d'un projet et l'ouverture effective de la mine, l'élasticité de l'offre de minerais est très faible à court terme (De Medeiros, 2006). Les épisodes conjoncturels affectent donc très peu les quantités extraites. L'objectif des entreprises minières est essentiellement d'ajuster au mieux la production avec les capacités existantes. Cette visibilité des besoins de la sidérurgie mondiale a pour conséquence, en particulier pendant le dernier quart du 20^{ème} siècle, le très faible niveau d'investissements de ces firmes. Les capacités de production ont en effet été essentiellement augmentées durant les Trente Glorieuses dans les principaux pays producteurs d'acier et dotés de gisements de minerais de fer. C'est le cas dans certains pays européens comme en France, en Allemagne ou en Suède,

mais aussi aux Etats-Unis et en URSS.

Comme le souligne Rogers (1987), le Brésil et l'Australie sont quasi inexistants sur le marché du minerai de fer avant la fin des années 60, période à partir de laquelle la chute du prix du fret permet l'explosion du commerce international. Entre 1970 et 1980, l'évolution du trafic maritime international des « principaux vracs secs » dont fait partie le minerai de fer ⁷, a par exemple progressé d'environ 78% (448 Mt en 1970 contre 796 Mt en 1980) (UNCTAD, 2011). Les capacités de transport et les infrastructures portuaires ont également facilité la hausse des échanges grâce aux économies d'échelle. Entre 1965 et 1975, les capacités de transport sont passées de 20 millions à plus de 125 millions de tonnes. Sur cette même période, les plus grands navires de charge ont fait passer leur capacité de 60 000 à 278 000 tonnes (De Medeiros, 2006). Par ailleurs, les entreprises minières australiennes peuvent bénéficier de la proximité avec les sidérurgistes japonais, dont la production est en plein essor. La meilleure qualité des gisements australiens et brésiliens permet également d'améliorer la compétitivité des sites sidérurgiques, au combien importante dans un contexte de plus en plus concurrentiel. Les gisements domestiques, en particulier européens, sont donc peu à peu délaissés au profit des gisements extérieurs. Les exportations de minerais australien et brésilien représentent ainsi en 1984, 57% des exportations totales de minerais à destination de l'Europe et des Etats-Unis, contre seulement 2% en 1960 (Jones, 1986). En parallèle, les autres pays traditionnellement producteurs de minerais ont vu leur production stagner (*e.g.* l'URSS) voir chuter (*e.g.* Canada, Etats-Unis). Concernant la structure du marché, comme l'illustre la Figure I.3 (source des données : UNCTAD (2014)), on constate une hausse de la concentration. La part de marché du premier extracteur et des trois principaux, a ainsi plus que doublé entre 1975 et 2000. Un phénomène qui s'est surtout accéléré sur la période 1995-2000 avec notamment la privatisation de CVRD (Brésil), alors leader sur le marché. En dépit de la hausse de la concentration du marché du minerai de fer, le pouvoir de marché

⁷Dans son étude, l'UNCTAD considère parmi les principaux vracs secs : le minerai de fer (environ 36% en 1984), les céréales, le charbon, la bauxite/alumine et le phosphate.

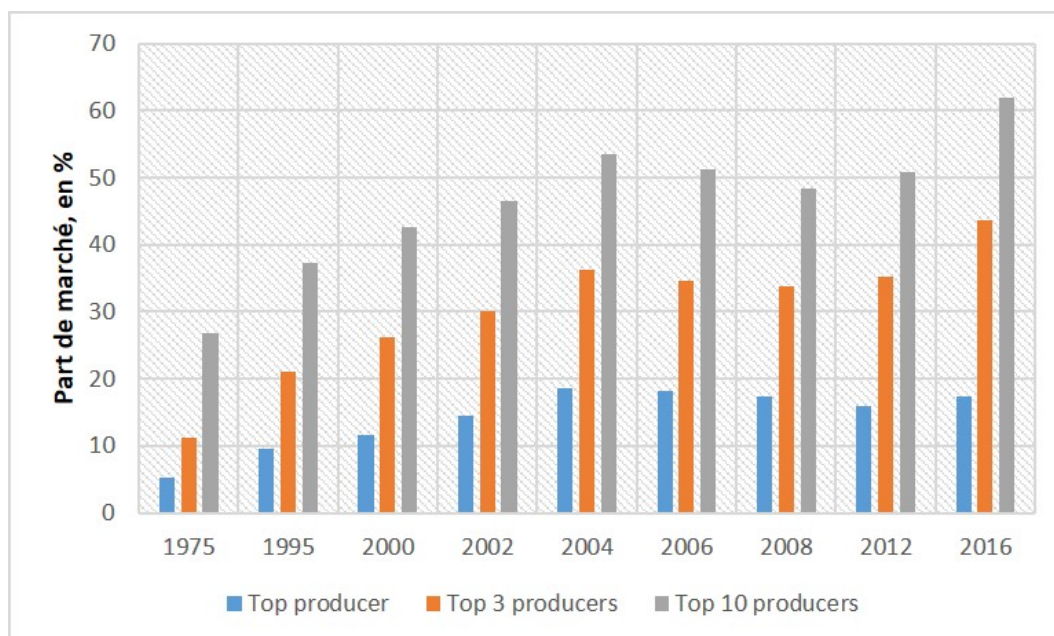


FIGURE I.3 – Part de marché des entreprises minières, en % de la production mondiale

est clairement resté du côté des sidérurgistes sur le dernier quart du 20^{ème} siècle. La difficulté pour amortir les investissements miniers donne en effet un pouvoir de marché important aux sidérurgistes lors des négociations. Une fois par an, les fournisseurs de minerai et les sidérurgistes se réunissent pour négocier le prix de ce dernier. Au bout de quelques semaines lorsqu'un accord est trouvé entre un sidérurgiste et une entreprise minière, toutes les autres négociations s'arrêtent et l'ensemble des prix s'alignent sur la nouvelle cotation de référence durant une année. Jusqu'au début des années 70, ces accords se déroulaient environ tous les trois ans et le prix pouvait rester fixe pendant plusieurs années, on parlait alors de *Long Term Contracts* ⁸. La confrontation entre un faible nombre d'entreprises minières et un faible nombre de sidérurgistes pour fixer le prix du minerai, constituait déjà un premier signe faisant référence à un oligopole bilatéral à l'échelle mondiale. D'une manière générale, durant les années 90, le prix est le fruit d'une négociation entre Australiens et Japonais ou bien entre Brésiliens et Européens, reflétant ainsi les principaux flux d'échanges entre régions. En effet, d'après Warell

⁸Une part variable était associée au prix selon la qualité du minerai et du lieu de dépôt.

et Lundmark (2008) et Germeshausen *et al.* (2015), les entreprises minières australiennes s'orientent principalement sur le marché asiatique, et dans une moindre mesure européen, alors que les firmes brésiliennes exportent uniquement sur le marché européen. Le prix, fixé à l'échelle mondiale, se voit alors attribué une part variable en fonction de la situation géographique et de la qualité du gisement. Par ailleurs, il est interdit pour les entreprises minières de proposer un prix inférieur au tarif négocié, comme il est interdit pour les sidérurgistes de contracter à un prix supérieur à celui négocié (Li et Sun, 2010). Ce procédé de fixation du prix permet aux acteurs de la filière de limiter la volatilité. Les relations entre les sidérurgistes et les firmes minières semblent donc relativement stables jusqu'à la fin des années 90.

3 Le bouleversement de la filière sidérurgique au début de années 2000

Les filières des principaux pays producteurs d'acier ont connu de nombreuses évolutions depuis un demi-siècle. La cyclicité de l'activité sidérurgique connaît néanmoins une phase d'apaisement au début des années 90 avec un niveau de production global qui varie assez peu. L'entrée de la Chine sur la scène internationale provoque alors au début des années 2000 un véritable bouleversement sur le marché sidérurgique.

3.1 Le choc de demande

La stabilité de la filière dont peuvent profiter les sidérurgistes jusqu'à la fin du 20^{ème} siècle, est subitement bouleversée par l'arrivée de la Chine sur la scène économique internationale. L'explosion des besoins chinois crée un choc de demande. L'ensemble de l'économie du plus vaste pays asiatique, auparavant totalement hermétique aux échanges commerciaux internationaux, doit encore plus ouvrir ses frontières notamment suite à son adhésion à l'OMC en 2001. Portée

par une urbanisation galopante et une hausse fulgurante de la production industrielle, l'industrie sidérurgique chinoise connaît un essor sans précédent. Comme le montre la Figure I.4, de 2003 à 2013 la production a pratiquement été multipliée par quatre avec un taux de croissance annuel moyen (TCAM) de 14.2% sur cette période contre 6% entre 1980 et 2000 (source des données : World Steel Association).

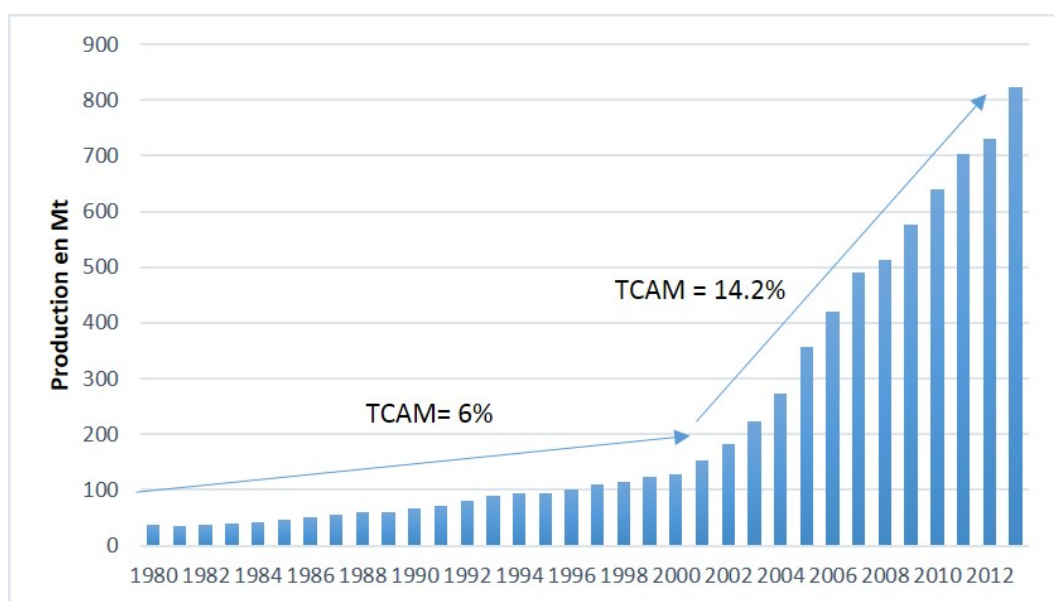


FIGURE I.4 – Production sidérurgique de la Chine entre 1980 et 2012

Entre 2000 et 2013, la consommation d'acier a ainsi principalement été portée par le secteur de la construction (46% en 2010) et le secteur industriel (33% en 2010) (BOC International, 2012). Pour satisfaire cette demande, les investissements dans les capacités de production sont passés en valeur nominale de 36.7 milliards de Yuan en 2000 à 453.1 milliards en 2010 (Feng, 1995).

Sur le marché du minerai de fer, ce choc de demande a plusieurs conséquences :

- Elargissement de l'offre de minerais vers le marché chinois entraînant une augmentation de l'utilisation des capacités de production des entreprises minières, jusque-là sous exploitées ;

- Hausse des investissements dans de nouvelles capacités de production minières ;
- Hausse du prix du minerai de fer et de l'acier générée par l'augmentation de la demande ;
- Augmentation de la rentabilité des entreprises minières grâce à l'arrivée de nouveaux débouchés et l'envolée du prix du minerai ;
- Basculement du pouvoir de marché et de la marge des sidérurgistes vers les entreprises minières.

Si les sidérurgistes sont en position de force face aux entreprises minières avant l'arrivée de la Chine sur le marché du minerai de fer, ils doivent faire face au cours des années 2000 à un durcissement des conditions de négociation et voient leur pouvoir de marché s'effriter au fil des années. En effet, les entreprises minières ont désormais une alternative à la demande européenne, japonaise et américaine pour écouler leur production. Ce choc permet un regain d'activité avec au niveau mondial des taux de croissance de production d'acier oscillant entre 7% et 8% par an de 2002 à 2006.

L'arrivée de la crise en 2008 a eu des répercussions importantes sur les sidérurgies européenne et américaine. Les effets sur les secteurs consommateurs d'acier sont dévastateurs. Dans certaines zones, la consommation chute de 30 à 50% (Faure, 2012). Entre 2007 et 2009, l'Union Européenne diminue ainsi sa production d'acier d'environ 34% (passage de 210 Mt à 139 Mt) ; l'Amérique du Nord, dont les trois quart de la production sont représentés par les Etats-Unis, voit la sienne également baisser sur la même période de 37% (Figure 1.5 ; source des données : World Steel Association) :

A l'inverse, en Chine, la demande interne en acier est tellement forte que la hausse de la production ne ralentit que très légèrement entre 2007 et 2008. Le pays poursuit sa marche en avant en maintenant une augmentation des quantités d'acier produites de presque 18% l'année suivante. En 2008 et en réponse instantanée à cette crise, le gouvernement chinois lance en effet un vaste plan d'investissements

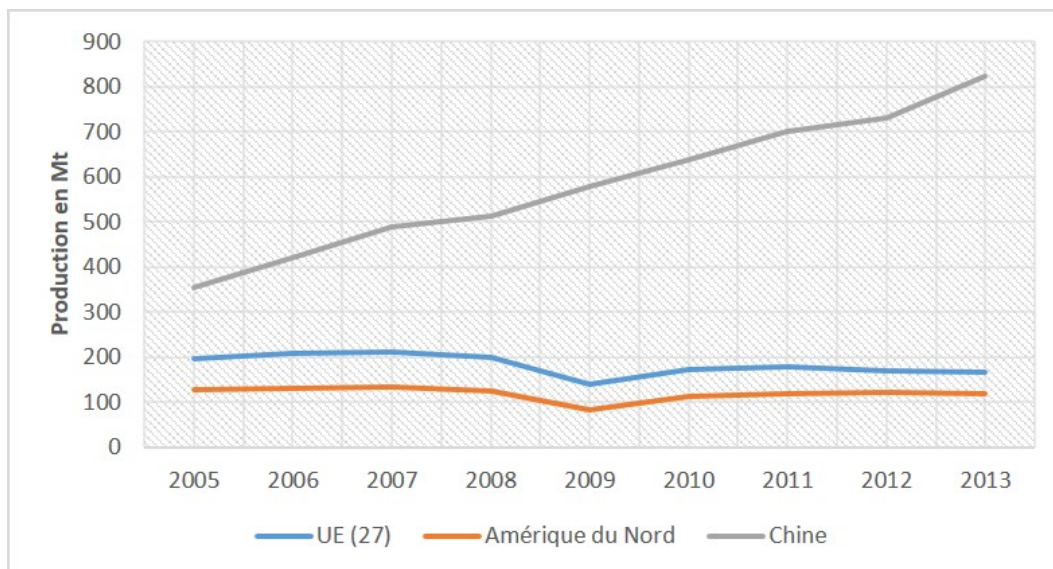


FIGURE I.5 – Production sidérurgique de l'UE(27), de l'Amérique du Nord et de la Chine entre 2000 et 2013

dans les secteurs traditionnellement consommateurs d'acier. Plus de 4 000 milliards de Yuan (soit 550 milliards d'Euros 2015) sont injectés dans la construction d'infrastructures routières et les aéroports. En amont, la baisse du volume de minerais extrait en 2008 puis en 2009, est alors rapidement gommée les années suivantes pour finalement atteindre 1 650 Mt en 2013 contre 1 343 Mt en 2008 et 1 238 Mt en 2009.

3.2 L'accélération de l'internationalisation des sidérurgistes comme réponse à la nouvelle concurrence ?

Il existe une importante disparité des acteurs sidérurgistes en termes de taille et de présence géographique ⁹. Si jusqu'à la fin des années 80, le marché mondial reste relativement fragmenté et peu mondialisé, dans les années 90 et encore davantage tout au long des années 2000, de nombreuses fusions et acquisitions s'opèrent à l'échelle nationale puis internationale, comme l'illustrent les exemples suivants :

- L'acquisition d'Ilva par Riva (Italie) en 1995 ;

⁹En Annexe I.B, nous présentons l'offre sidérurgique aujourd'hui.

- La fusion de NKK et Kawasaki (Japon) pour constituer JFE en 2002 ;
- L'acquisition de LNM (Pays bas) et Ispat International (Inde) par Mittal Steel (Pays Bas) en 2004 ;
- L'acquisition de Corus (né d'une précédente fusion du néerlandais Hoogovens avec le britannique British Steel en 1999) par Tata Steel (Inde) en 2006 ;
- La fusion d'Arcelor (né d'une précédente fusion entre Arbed (Luxembourg), Aceralia (Espagne) et Usinor (France) en 2002) et Mittal Steel (Pays bas) en 2006 pour former le plus grand groupe sidérurgique mondial ArcelorMittal (Luxembourg) ;
- L'acquisition de Stelco (Canada) par US Steel en 2007 ;
- La fusion entre Sumitomo Metal et Nippon Steel en 2012, pour former Nippon Steel et Sumitomo Metal Corporation (NSSMC).

Ces opérations d'intégration horizontale aboutissent à la constitution de groupes sidérurgiques d'ampleur mondiale. Un phénomène qui n'a toutefois pas d'impact réel sur l'évolution du partage des parts de marché entre les groupes en raison de l'émergence de nouveaux producteurs chinois en parallèle. La Figure I.6 montre l'évolution des dix plus grands groupes sidérurgiques depuis le début des années 2000 jusqu'à 2017 (source des données : World Steel Association).

Elle met en perspective l'apparition progressive des acteurs chinois et le regroupement des concurrents internationaux en réponse à ce changement structurel sur le marché. Toutefois, en dépit de la présence de grands groupes internationaux et en se référant à la part de marché des sidérurgistes les plus importants, il ne semble pas que le marché mondial de la sidérurgie soit davantage concentré en 2017 qu'il ne l'était quelques années auparavant. En théorie, les effets de l'intégration horizontale sur le marché sont néfastes pour le consommateur car, toute chose égale par ailleurs, ce type d'opération aboutit à une plus forte concentration de l'offre,

	1998			2003			2008			2013			2017		
1	POSCO	25.6		Arcelor	42.6		ArcelorMittal	101.6		ArcelorMittal	96.1		ArcelorMittal	97	
2	Nippon Steel	25.1		Mittal Steel	35.3		Nippon Steel	37.5		NSSM Corp.	50.1		China Baowu Steel	65.4	
3	Arbed	20.1		Nippon Steel	31.3		Baosteel	35.4		Hebei Steel	45.8		NSSM Corp.	47.4	
4	Usinor	18.9		JFE	30.2		Hebei Steel	33.3		Baosteel	43.9		Hesteel	45.6	
5	LNM	17.1		POSCO	25.9		JFE	32.4		Wuhan Steel	39.3		POSCO	42.2	
6	Corus	16.3		Shangai Baosteel	19.9		POSCO	31.7		POSCO	38.4		Shagang	38.4	
7	Thyssen Krupp	14.8		Corus	19.1		Wuhan Stel	27.7		Shagang	35.1		Ansteel	35.8	
8	Riva	13.3		US Steel	17.9		Tata Steel	24.4		Ansteel	33.7		JFE	30.2	
9	NKK	11.9		Thyssen Krupp	16.1		Shandong	23.8		Shougang	31.5		Shougang	27.6	
10	USX	11.1		Nucor	15.8		US Steel	23.2		JFE	31.2		Tata Steel	25.1	
Total production in Mt, and market share in %		174.2 Mt	24%		254.1 Mt	27%		371 Mt	26%		445.1 Mt	27%		454.7 Mt	27%
			Chine		Japon		Union Européenne		Corée du Sud		Etats-Unis		Inde		

FIGURE I.6 – Production d'acier des 10 premiers sidérurgistes mondiaux

et donc à un prix d'équilibre supérieur au prix concurrentiel ¹⁰. Dans sa forme extrême et sans intervention publique, nous assisterions à la formation progressive d'un monopole. Pour cette raison, les autorités ont un droit de regard et peuvent s'opposer à une éventuelle opération d'intégration. Ainsi, les Etats-Unis et l'Union Européenne publient par exemple des lignes directrices relatives aux intégrations horizontales (et verticales) ¹¹. Les éventuels gains d'efficacité et pertes sèches sont alors mesurés pour la délivrance ou non d'une autorisation de l'opération. Par ailleurs, d'après le *1992 Horizontal Mergers Guidelines* publié par le *Department of Justice* et la *Federal Trade Commission* des Etats-Unis, la présomption d'effets anti-concurrentiels incarnée par une hausse du prix, suffit à remettre en question la fusion quelle que soit l'importance des gains d'efficacité. Concernant le marché du fer et de l'acier, la demande anticipée à l'échelle mondiale est très forte et l'arrivée de nouveaux acteurs sur la scène internationale limite donc les potentiels effets dommageables pour le consommateur. En revanche, l'analyse économique de ces situations s'avère complexe car si au niveau mondial des fusions et acquisitions

¹⁰Cependant, dans certains cas des gains d'efficacité liés aux économies d'échelle peuvent apparaître, et bénéficier aux consommateurs.

¹¹La dernière version des lignes directrices aux Etats-Unis date de 2010, alors qu'en Union Européenne, les lignes directrices ont été publiées au Journal Officiel en 2004.

sont envisageables au regard de l'internationalisation du marché, les éventuels gains d'efficience ne sont pas aussi évidents au niveau régional. Les nouveaux acteurs, essentiellement chinois, exercent uniquement leur activité sur le marché domestique alors que les fusions et acquisitions s'opèrent entre sidérurgistes des pays industrialisés. C'est notamment pour cette raison que l'identification du marché pertinent, qu'il soit géographique ou stratégique, est un préalable indispensable lors de l'intervention des économistes dans les procès *antitrust*.

3.3 Les enjeux stratégiques de la filière

L'intégration verticale : stratégie amont ou aval ?

La stratégie de l'intégration verticale se pose en général pour chaque entreprise et est au cœur de la réflexion sur la théorie des organisations. Marshall (1890) se penche sur les concentrations industrielles en tant qu'économie externe et en 1919, il évalue les avantages d'une intégration verticale en évoquant déjà les notions d'effets de synergie ou d'accès sécurisé aux matières premières (Marshall, 1919). Il existe par ailleurs une littérature abondante sur ce type de stratégie. Quelques décennies plus tard, Porter (1982) livre une définition synthétique en considérant que « l'intégration verticale représente la décision d'une firme d'utiliser des transactions internes, d'ordre administratif, plutôt que des transactions marchandes pour réaliser ses objectifs économiques ». Cette approche s'apparente à ce que Coase (1937) appelle les « coûts de transaction ». Dans l'intégration verticale, on présuppose la substitution de l'entreprise au marché lorsque le coût d'une transaction marchande est supérieur au coût d'une transaction réalisée au sein de la firme. Une autre approche peut considérer cette stratégie comme une opération qui s'effectue purement au niveau productif ; soit la réunion de deux activités de production telles que le produit de l'une soit le facteur de production de l'autre (Perry, 1989). Concernant la filière sidérurgique, avant les années 2000, l'intégration verticale n'est pas une stratégie courante. En amont, les coûts de transaction sont relativement faibles grâce à un marché stabilisé dans lequel les sidérurgistes détiennent

un pouvoir de marché important. Au vu des coûts fixes très élevés du secteur de l'extraction et du faible prix du minerai, ils sont donc peu nombreux à se lancer dans le secteur minier. De même, peu de sidérurgistes s'intègrent en aval en raison de l'importance des compétences complémentaires nécessaires pour intégrer l'industrie automobile, l'aéronautique ou encore la construction. Enfin, l'activité sidérurgique étant profitable, le coût d'opportunité de se lancer dans une autre activité devient dès lors relativement faible.

Néanmoins, l'arrivée de la Chine sur le marché vient bouleverser ce contexte et les stratégies d'intégration antérieures deviennent dès lors caduques. En effet, la hausse du prix du minerai qui a suivi la forte demande, raisonne comme le moteur d'une profitabilité nouvelle pour des entreprises minières, peu enclines à l'investissement quelques années auparavant. En l'espace d'une dizaine d'années la marge des entreprises minières est multipliée par trois au détriment des sidérurgistes (McKinsey, 2013). Un tel changement de contexte rend l'intégration en amont plus attractive pour les sidérurgistes. Maîtriser son approvisionnement et absorber une partie de la marge est alors l'objectif de certains acteurs de l'acier. Après 2003, ArcelorMittal fait en effet le choix d'acquérir des mines au Canada et au Brésil. Non seulement cette stratégie présente l'avantage de s'affranchir en partie des conditions de négociation des fournisseurs, mais avec un prix du minerai élevé, elle permet de gagner des parts de marché face aux concurrents directs dont les coûts de production augmentent. En 2017, ArcelorMittal assure un approvisionnement en minerai de fer en provenance de ses propres mines à hauteur d'environ 48% (source : ArcelorMittal). Dans un degré moindre, Tata Steel opte aussi pour cette stratégie en investissant en Inde et pour la production domestique indienne. Sécuriser l'approvisionnement et chercher à capter la valeur ajoutée en amont s'avèrent en théorie plutôt bénéfique mais comportent certains risques. Le secteur minier requiert de lourds investissements qu'il est difficile de rentabiliser et adopter une vision de court terme dans ce secteur est dès lors assez risqué. Le retournement du marché créé par la crise de 2008 fragilise considérablement la

position de ces sidérurgistes apprentis extracteurs. La chute du prix de l'acier a mis en difficulté tout le secteur. Les investissements consentis (*via* l'endettement) pour l'achat des actifs miniers s'avèrent donc un poids important pour les acteurs intégrés et fragilisent leur situation financière. A ceci s'ajoute la nécessaire diminution du volume de production en réponse à l'effondrement de la demande. Depuis cette crise, la timide reprise de la croissance en Europe et le ralentissement en Chine n'a ni effacé l'accumulation des dettes, ni permis à ArcelorMittal d'augmenter l'utilisation de ses capacités de production et donc sa production. Cette stratégie risquée en période d'abondance de minerai et de faible prix de l'output a conduit ArcelorMittal à se séparer d'une partie de ses actifs miniers comme au Québec. Par ailleurs, de manière plus spécifique, certains acteurs régionaux choisissent également d'investir dans les mines en raison d'un ou plusieurs gisements présents sur le territoire domestique. C'est le cas de la quasi-totalité des sidérurgistes russes et ukrainiens, des Brésiliens Gerdau et Usinimas, d'Ahmsa au Mexique, ou encore de Sail en Inde. L'intégration vers l'amont a donc été suivie par un certain nombre de sidérurgistes qui, soit pouvaient bénéficier de gisements de proximité, soit de conditions d'endettement moins restrictives de par leur dimension globalisée. Dans la littérature, Scheuplein (2010) remet en cause les approches traditionnelles de la stratégie d'intégration verticale. En s'appuyant sur le contexte de la filière sidérurgique post-crise économique de 2008 et de la théorie de la polarisation mise en évidence par Perroux (1964), il souligne le rôle important joué par les conditions macroéconomiques. Ainsi, la tendance actuelle d'intégration verticale se réalise quasi exclusivement par les sidérurgistes chinois, et quelques autres acteurs en provenance de pays émergents. A l'inverse, cette stratégie n'est quasiment plus adoptée par les sidérurgistes issus des pays industrialisés comme les Etats-Unis, le Japon, ou ceux membres de l'Union Européenne.

Le retournement du marché en 2008 montre que la stratégie d'intégration en amont nécessitant un endettement important, présente certaines limites. La tendance désormais partagée par la quasi-totalité des sidérurgistes, est donc l'orien-

tation vers l'aval, où l'objectif est d'intégrer au maximum la maîtrise du laminage à froid qui donne davantage de valeur ajoutée au produit. L'aboutissement de ce processus est la constitution, non plus d'un semi-produit sidérurgique, mais d'un produit fini directement intégrable par les industriels. Par ailleurs, le positionnement vers l'aval de la filière sidérurgique n'est pas une condition suffisante pour justifier la rentabilité d'un sidérurgiste. Plusieurs autres éléments propres aux entreprises peuvent entrer en jeu comme par exemple la gestion sociale ou les dépenses en recherche et développement.

D'une manière plus générale, cette stratégie consiste à sortir du segment des commodités et évoluer vers les 14% de produits restants affichant une plus forte valeur ajoutée, voir même vers les 1% d'acier de spécialité. En règle générale, ce sont donc les entreprises de niche qui sont spécialisées sur les aciers de spécialité. Pour les grands groupes mondiaux ou régionaux, ces produits représentent un complément d'activité. Pour la conception de produits plus stratégiques répondant à des secteurs plus spécifiques comme l'aéronautique, l'automobile ou l'énergie, des investissements dans de nouvelles technologies et dans la recherche et développement sont alors requis. Par ailleurs, depuis quelques années, certains sidérurgistes préfèrent acheter directement les semi-produits (billettes, brames ou blooms) à d'autres entreprises dans le monde, pour ensuite les transformer en produits finis. Le faible prix du fret favorise cette stratégie qui reste cependant minoritaire parmi les sidérurgistes européens. Néanmoins, au même titre qu'en amont où l'activité minière est spécifique, l'activité d'un sous-traitant pour transformer l'acier en produit à plus forte valeur ajoutée comporte un savoir-faire que tous les sidérurgistes ne peuvent pas nécessairement maîtriser. C'est également un segment qui va s'avérer de plus en plus concurrentiel pour les prochaines années, d'autant que les besoins en acier de spécialité restent relativement limités en volume, et que ceux en commodités vont diminuer.

Des surcapacités persistantes

De la difficile évaluation des surcapacités à la recherche du pic de consommation d'acier

Depuis la fin des Trente Glorieuses, la sidérurgie mondiale connaît des périodes de récession plus ou moins longues. Au niveau européen, ce phénomène s'observe tout d'abord dans les années 70 où la diminution de la demande d'acier suite au premier choc pétrolier et à l'augmentation de la concurrence internationale, fait baisser le taux d'utilisation des capacités de production à moins de 50%. Les surcapacités européennes restent globalement toujours supérieures à celles de leurs principaux concurrents américains et japonais de l'époque. Dans les faits, il est assez difficile d'estimer précisément les surcapacités. De nombreux facteurs entrent en ligne de compte et de réelles différences existent selon les types de produits, entre la filière électrique et oxygène ou encore entre les sidérurgistes eux-mêmes. D'une manière générale, il est nécessaire d'anticiper la demande et à cet égard, certains économistes se sont penchés sur les tendances de consommation d'acier de pays comme la Chine (McKay *et al.* (2010) ; Gao et Wang (2010) ; Yin et Chen (2013)), le Japon (Crompton, 2000), la Pologne (Rebiasz, 2006), ou ont cherché à expliquer les différences de consommation entre les pays de l'OCDE (Crompton, 2015). Le constat général qui ressort est qu'une large part de la variation de la consommation d'acier est expliquée par une variation du PIB. Ensuite, les estimations de tendances de consommation peuvent varier fortement d'une étude à l'autre, en raison des différences de méthodologies utilisées et des multiples facteurs jouant sur la demande (Yin et Chen, 2013). Les études économétriques sont les plus couramment utilisées (Olsson et Warell (2009) ; Gao et Wang (2010) ; Wu (1995)) et montrent l'augmentation rapide de l'intensité d'utilisation de l'acier (*i.e.* rapport de la consommation d'acier par rapport au PIB) dans les premières phases de développement économique, c'est-à-dire la période d'industrialisation. Cette intensité ralentit puis se met à décliner à mesure que le secteur des services prospère au détriment du secteur industriel : la courbe de consommation d'acier s'avère

être une courbe concave. Identifier cette demande sur le moyen et le long terme permet notamment aux pouvoirs publics et aux industriels d’anticiper la demande et donc les capacités de production nécessaires pour y faire face. C’est d’autant plus important compte tenu de la rigidité de l’appareil productif sidérurgique (*i.e.* faible capacité à s’adapter aux variations de la demande). L’objectif est donc actuellement de déterminer le pic de consommation d’acier en Chine, voir dans les autres pays émergents comme l’Inde, tel qu’il est apparu pour les Etats-Unis dans les années 70 et pour le Japon dans les années 80 (Yin et Chen, 2013).

Des surcapacités à géométrie variable

Sur le plan mondial, comme le montre la Figure I.7, la crise de 2008 a renforcé l’écart entre les capacités installées et la consommation apparente d’acier.

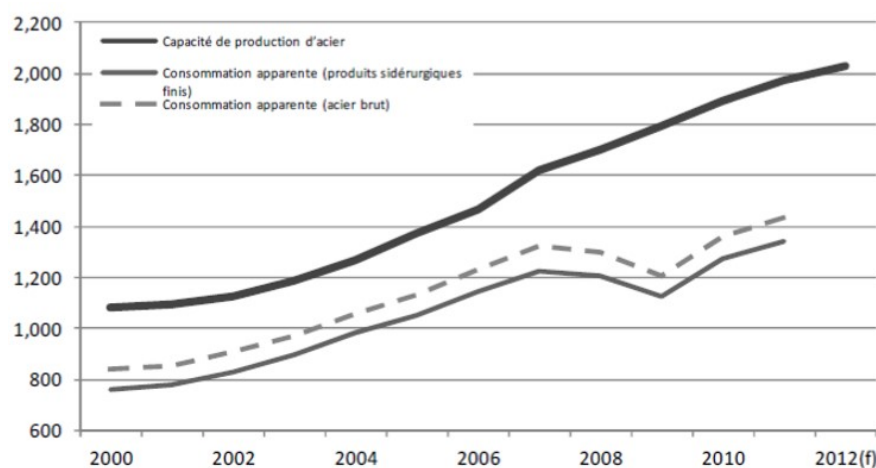


FIGURE I.7 – Capacités de production et consommation apparente d’acier mondiale, en Mt (source : Faure (2012))

Cet écart s’est maintenu les années suivantes car la diminution du taux de croissance de la demande d’acier, s’est accompagnée d’une hausse des capacités installées notamment dans les pays émergents (McKinsey et OECD, 2013) ¹². Des fermetures de capacité de production sont donc probablement nécessaires, comme

¹²Ce constat est partagé par certains acteurs et observateurs de la filière sidérurgique (entretiens menés avec M. Marchand (Ministère de l’Economie, de l’Industrie et du numérique), M. Berthier (Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux) et M.Genet (LaPlace Conseil) entre mars et mai 2015)

le soulignait déjà en 2012 Wolfgang Eder, ancien président de la Fédération Européenne des Sidérurgistes (Eurofer). Selon lui, 40 à 50 Mt de capacités devaient être retirées sur les 210 Mt installées en Europe ¹³. Ces surcapacités cachent des situations plus variées au niveau régional. En particulier, ArcelorMittal est régulièrement accusé d'être le principal responsable de ces surcapacités, notamment en Europe *via* sa domination sur la filière des produits plats où il concentre plus d'un tiers de la production pour un taux d'utilisation des capacités d'environ 60%. Ce taux de capacité est encore plus faible dans les pays d'Europe de l'est comme en Pologne ou en Roumanie, dont le « sureffectif » des sites est également à souligner (Faure, 2012). En conséquence, la compétitivité des sites roumains d'ArcelorMittal est bien inférieure à celle de ses concurrents directs russes et ukrainiens pour le marché de l'Europe centrale et de la Mer Noire. Par ailleurs, la diminution des surcapacités n'est pas simple en Union Européenne tant le poids historique de la filière est important. Les forces politiques et syndicales jouent un rôle déterminant pour éviter des répercussions sociales néfastes au sein de leur territoire, autrefois trop dépendants de cette filière et dont la reconversion est lente et complexe. En Chine, l'explosion des besoins a suscité un regain d'investissement dans de nouvelles infrastructures. Des usines modernes et surcapacitaires cohabitent désormais avec des unités plus petites et obsolètes. Depuis quelques années, malgré la volonté du gouvernement de fermer ses usines de moindre taille, l'augmentation des capacités de production des sites plus modernes est telle, que l'effet sur les surcapacités est nul. Alors que 51.8 Mt de capacités ont fermé entre 2010 et 2013, 40 Mt de nouvelles capacités ont été ouvertes pour la seule année 2013 (Ministère de l'économie - DG Trésor, 2014). Depuis juillet 2014, le gouvernement central chinois a donc décidé de conditionner l'ouverture de nouvelles capacités par la fermeture d'anciens sites. Toutefois, cette politique dépend également de la bonne volonté des autorités locales car en réalité et à l'image de la situation en Europe, elles sont assez réticentes à l'idée de fermer leurs usines en raison du potentiel impact économique et social que ces fermetures pourraient engendrer.

¹³Financial Times, 3 mars 2013

Ainsi, entre 2014 et 2016, les capacités de production chinoises ont diminué de 4.9%, tout comme en Union Européenne. En parallèle, les capacités en Inde ont augmenté de 15% sur cette même période (GFSEC, 2017).

Avec un taux d'utilisation des capacités de production moyen d'environ 75% en 2013, la Chine se situait en dessous du taux moyen mondial de 80%, contre 85% en 2010 et 93% en 2008. Comme en Europe, ce taux variait selon les sidérurgistes chinois, mais dans le sens inverse. Les moyens et grands sidérurgistes comme Baosteel présentaient par exemple un taux d'environ 79% alors que les petites unités, non membres de *Chinese Iron and Steel Association* (CISA) ¹⁴, avaient des taux d'utilisation autour de 60% (Ministère de l'économie - DG Trésor, 2014). Ce faible taux associé au ralentissement de la demande a pesé sur la situation financière de la filière sidérurgique chinoise et a renforcé le besoin de restructuration du secteur, toujours d'actualité ces dernières années. Au regard du poids de la Chine sur le marché mondial, l'impact de ces surcapacités se fait également ressentir chez les sidérurgistes internationaux. En plus de tirer les prix vers le bas, elles conduisent également les acteurs domestiques à écouler leur production hors du marché chinois et inonder les autres marchés, notamment européens.

4 Le rôle des entreprises minières dans une structure de marché en mutation : d'un oligopole à un potentiel monopsone contrarié

Le choc de demande des années 2000 n'a pas seulement eu un impact sur les sidérurgistes mais également en amont, sur les fournisseurs de minerai de fer. Suite à ce choc, leur rôle change tant l'extraction de leur précieux minerai est désormais convoitée. Néanmoins, après avoir atteint un pic en 2011, le prix du

¹⁴Créée en 1999, le CISA est l'entité qui représente à la fois les intérêts des sidérurgistes chinois auprès de leurs homologues internationaux et institutions internationales, et à la fois le rôle d'intermédiaire avec le gouvernement chinois pour l'application des règles et lois décidées par le pouvoir central (*e.g.* licence d'autorisation d'importation).

minéral de fer connaît une forte baisse et ce nouveau contexte économique vient de nouveau bouleverser toute une filière, dont l'acteur majeur devient la Chine face à la domination de quelques entreprises minières en amont.

4.1 L'effet des fusions et acquisitions sur la concentration de la production

A l'image du secteur de l'extraction dans son ensemble, une vague de fusions et acquisitions entre entreprises minières s'est produit à partir de la fin des années 90. Un phénomène qui, certes, renforce la concentration du marché toute chose égale par ailleurs, mais semble être à relativiser avec l'augmentation parallèle de la demande.

L'effervescence de la croissance externe

En 2006, 140 milliards de dollars ont été dépensés dans les stratégies de croissance externe. C'est cinq à six fois le montant moyen dépensé chaque année entre 1995 et 2006. Le précédent record datait de 2001 avec un montant total de fusions et acquisitions estimé à près de 40 milliards de dollars selon Ericsson (2007). Derrière ces transactions, il peut soit y avoir une volonté d'améliorer l'efficacité de la firme (*i.e.* exploiter des synergies, atteindre une taille critique et obtenir des économies d'échelle dans une industrie très capitalistique), soit d'accroître son pouvoir de marché (Warell, 2007). En parallèle, ce phénomène peut dissuader les potentiels nouveaux entrants non extracteurs, qui chercheraient par exemple à sécuriser leur approvisionnement. Dans son article sur les intégrations horizontales dans le secteur du minéral de fer, Warell (2007) démontre que la fusion entre Rio Tinto et North Ltd fut réalisée avec pour principal motif, l'efficacité, alors que le motif d'augmentation du pouvoir de marché était certes présent, mais non dominant. A l'image de l'impact de cette fusion sur la structure du marché, le secteur du minéral de fer est l'un des seuls ayant connu une tendance de consolidation en continu, depuis les années 70 (Ericsson, 2001). Des transactions de

grande échelle ont eu lieu comme celle déjà évoquée entre Rio Tinto et North Ltd en 2000, Vale (également appelé CVRD dans les années 2000 pour « Companhia Vale do Rio Doce ») et Ferteco en 2001 ou encore Vale et Caemi en 2001. Au même titre que pour les intégrations horizontales entre sidérurgistes, l'impact de chacune des transactions fait l'objet d'une analyse des autorités afin d'évaluer les conséquences des différentes opérations sur le marché, tant pour les consommateurs finaux que pour les concurrents. En l'occurrence, les exemples cités ont tous bénéficié d'une autorisation sans conditions, à l'exception de Vale et Caemi. Cette dernière firme a en effet été contrainte de céder 50% de ses actifs à un extracteur canadien, *Quebec Cartier Mining company* (Commission Européenne, 2001). En revanche, la fusion des activités de production et de transport de minerai de fer entre Rio Tinto et BHP Billiton proposée en 2009, a reçu un avis défavorable des autorités concurrentielles australiennes, européennes et chinoises. Cette tendance à l'intégration horizontale est retombée ces dernières années mais la baisse du prix du minerai qui s'est produite depuis 2014 constitue un élément pouvant relancer le phénomène. Certaines entreprises minières, en particulier chinoises, ont en effet des coûts de production trop élevés pour pouvoir être rentables avec un prix du minerai inférieur à 60 US\$ par tonne, comme il a été observé entre 2014 et 2016. La mauvaise qualité du gisement, l'importance du coût du travail, la faiblesse technologique de l'outil de production et l'éloignement des sites sidérurgiques expliquent cette faible compétitivité, qui, sans l'intervention des pouvoirs publics, provoquerait la fermeture de nombreux sites ou la revente à des concurrents.

Un impact relatif sur la concentration du marché

Comme le montre la Figure I.3, la concentration du secteur s'est surtout réalisée avant les années 2000 où la part de marché du premier extracteur et des trois principaux, a plus que doublé. Par ailleurs, la période 1995-2000 fut particulièrement agitée avec notamment la privatisation de CVRD. C'est ensuite un phénomène de consolidation qui s'est opéré avec le choc de demande.

Depuis 2004, le premier producteur de minerai, le Brésilien Vale, voit sa part

de marché se contracter légèrement au bénéfice de ses concurrents directs sur la scène internationale, l'anglo-australien Rio Tinto et l'australien BHP Billiton, respectivement deuxième et troisième producteurs mondiaux (Figure I.8). Sur le plan mondial, le choc de demande en acier et donc en minerai, profite tout d'abord aux entreprises minières brésiliennes et australiennes, qui, à la différence de leurs concurrents canadiennes, indiennes ou suédoises, s'avèrent être capables d'ajuster leur offre de court terme (Hellmer et Ekstand, 2012). En revanche, l'effet sur la concentration du secteur reste relatif si l'on se réfère à l'indice Hirschmann-Herfindhal (indice HHI) sur la période 2003-2012. Selon Hurst (2015), l'indice HHI du marché du minerai de fer à l'export (ou marché *seaborne*), est resté entre 1200 et 1600 alors que la valeur au-dessus de laquelle un marché est considéré comme hautement concentré aux Etats-Unis, est de 2500 (US Department of Justice, 2010). En tenant compte uniquement de ce critère, le marché de l'extraction du minerai de fer semble relativement concurrentiel mais marqué par la position dominante de trois entreprises, également appelé le *Big 3*. La frontière entre une telle structure de marché et l'existence d'un potentiel oligopole pouvant aboutir à des pratiques anticoncurrentielles, reste toutefois délicate à définir. Certains dirigeants et commentateurs chinois ont notamment dénoncé des pratiques du *Big 3* visant soit à manipuler directement le prix, soit de manière indirecte, en limitant l'approvisionnement en minerai (Du (2012) ; Zhang et Lan (2010)).

4.2 L'oligopole théorique à l'épreuve des faits

Depuis 2013, la production mondiale de minerai de fer évolue au-dessus des 2 000 Mt. Aux principales entreprises minières que sont Vale, Rio Tinto et BHP Billiton, il faut dorénavant ajouter un quatrième acteur : Fortescue Metals Group (FMG). Arrivé sur le marché en 2006 suite au choc de demande, FMG extrait uniquement en Australie et exporte quasi exclusivement sur le marché chinois (90 Mt de minerais extraits en 2013 et 170 Mt en 2016). Même si la position dominante de ces quatre acteurs depuis quelques années n'aboutit pas à un marché très concentré, il semble nécessaire d'analyser le marché de plus près, ses barrières

à l'entrée ainsi que la stratégie adoptée par les entreprises minières quelques années après le choc de demande.

Sur le marché seaborne

Parallèlement à ce *Big 4* (Chalmin, 2015) et aux extracteurs chinois, d'autres entreprises de taille plus modeste sont présentes en Russie, Ukraine, Afrique du Sud, Inde ou encore aux Etats-Unis et au Canada. Toutefois, une part importante de ce minerai n'est pas exportée et est destinée au marché domestique. En 2016, les exportations se sont élevées à 1 585 Mt pour représenter 75% de la production totale de minerai de fer. Parmi ces exportations, 78% étaient en provenance du Brésil et d'Australie en 2016 (Figure I.8 ; source des données : Chalmin (2015)).

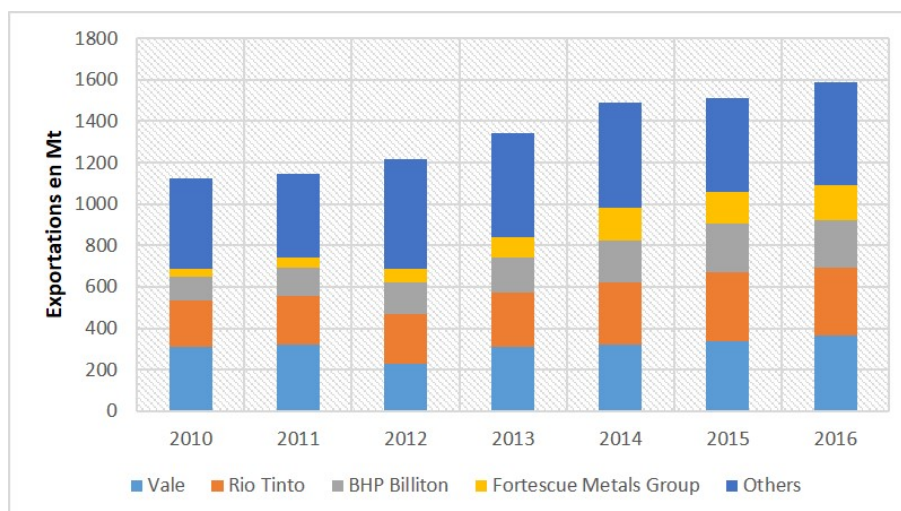


FIGURE I.8 – Exportations de minerais de fer par firme, en Mt

De 2012 à 2016, les quatre entreprises minières les plus importantes ont fait passer leur part de marché de 56% à 69% grâce à la hausse de leurs capacités de production et donc une augmentation du volume extrait.

Au delà de la concentration du marché

Caractériser l'absence d'un oligopole parce que le marché n'est pas concentré et l'indice HHI en dessous de 2500 sur la période 2003-2012, ou identifier un oligo-

pole car le marché s'avère davantage concentré quelques années plus tard, n'est qu'une analyse partielle de la structure d'un marché. En effet, l'oligopole est une situation de marché où le nombre de producteurs est suffisamment limité pour que les décisions de l'un d'entre eux aient une influence sur les décisions des autres et réciproquement. L'interdépendance entre les firmes induit de potentiels comportements stratégiques, qu'ils soient coopératifs ou non. Carlton et Perloff (2008) font effectivement la distinction entre les membres d'un cartel qui coordonne explicitement leurs activités, et un petit nombre d'entreprises « qui agissent en toute indépendance mais qui sont pleinement conscientes de leur coexistence ». Ils soulignent que la frontière entre l'oligopole coopératif et non coopératif est par ailleurs difficile à trancher. Concernant le marché du minerai de fer, suite au choc des années 2000, l'approvisionnement de la Chine en matières premières devient la priorité des principales entreprises minières. Néanmoins, la demande est tellement forte que les entreprises minières éprouvent même des difficultés à court terme à alimenter l'économie chinoise. Il existe en effet un délai d'ajustement entre la décision d'investir et le moment où la mine devient opérationnelle. Ce choc de demande a donc pris les entreprises minières de court et la faiblesse du prix du minerai qui règne jusqu'au début des années 2000, ne leur permet pas de pouvoir investir massivement dans de nouvelles capacités de production suffisantes pour répondre au surplus de demande. C'est le cas pour les principales entreprises minières australiennes et brésiliennes mais également pour les concurrents de plus petite taille. Malgré un coût marginal *a priori* supérieur, ces derniers tirent en effet avantage de ce nouveau contexte avec une augmentation moyenne de leurs exportations de 14% par an sur la période 2003-2009 (Hurst, 2015). Néanmoins, le *Big 3* reste le principal bénéficiaire du choc de demande, avec un taux d'utilisation des capacités de production qui atteint les 100%. Dans ce contexte où chacune des trois principales firmes produit à pleine capacité et cherche à investir pour combler la demande, il semble difficile de considérer l'effectivité théorique de l'oligopole (*i.e.* prise en considération de la stratégie des deux firmes concurrentes pour définir la sienne). Les éventuelles stratégies d'offre sont gommées par

la robustesse de la demande où chaque quantité marginale extraite est aussitôt absorbée par les sidérurgistes chinois. L'enjeu semble en effet davantage se trouver dans la découverte des meilleurs gisements qui permettent d'assurer un approvisionnement de la demande à long terme. C'est précisément sur cette étape que les firmes brésiliennes et australiennes se démarquent grâce à un minerai plus riche en teneur en fer. Cet avantage prend d'ailleurs pleinement son effet quelques années plus tard où entre 2010 et 2012, lorsque le *Big 3* affiche une croissance de ses exportations de minerais de 8.8% par an, contre environ 1.7% pour ses concurrents (Hurst, 2015).

Les barrières à l'entrée

Comme tous les secteurs d'extraction, on note également l'existence de barrières à l'entrée importantes, dont voici les principales :

- Taille minimale efficiente : l'achat des concessions minières auprès des pouvoirs publics nécessitent une taille minimale efficiente. Toute nouvelle entreprise voulant entrer sur le marché de l'extraction du minerai doit avoir une solidité financière suffisante pour pouvoir faire face à des coûts fixes extrêmement importants. A l'achat de la mine, il faut également ajouter l'éventuelle construction d'infrastructures pour acheminer le minerai vers les ports et/ou vers les sites sidérurgiques.
- Coût moyen faible : la production des entreprises existantes est aujourd'hui suffisamment élevée pour amortir les investissements consentis et atteindre un coût moyen relativement faible, en particulier pour le *Big 3*.
- Barrière institutionnelle : l'achat des concessions relève soit d'une négociation avec une autorité publique soit du rachat d'un actif auprès d'un concurrent (ou d'une entreprise en amont pour les sidérurgistes). Concernant le premier cas, une barrière institutionnelle peut être présente sur le marché si les pouvoirs publics ne consentent pas à vendre leur(s) actif(s) à une quelconque

société mais conditionnent la vente à un critère discriminatoire (*e.g.* nationalité de l'entreprise). De plus, les gisements australiens et brésiliens sont parmi les plus riches en fer du monde, donnant un avantage considérable aux entreprises déjà installées face aux potentiels entrants. A titre d'exemple, les chinois, malgré leurs besoins en minerai colossaux, ne peuvent se passer du minerai australien ou brésilien, pour son coût mais aussi pour sa qualité. La stratégie chinoise s'oriente donc de plus en plus vers l'investissement dans des actifs à l'étranger plutôt que du développement de ses propres gisements.

- Effets d'expérience : l'ancienneté de la présence des entreprises minières sur le marché constitue une barrière à l'entrée importante. En plus de la diminution des coûts moyens acquise grâce à un effet d'expérience, les relations avec les sidérurgistes sont déjà établies, ce qui permet de baisser les coûts de transaction.

Compte tenu du temps et de la difficulté nécessaires pour non seulement ouvrir une mine mais aussi la rentabiliser, l'élasticité prix de l'offre de minerai est donc relativement faible. A l'image de tout le secteur de l'extraction, il est donc difficile pour une entreprise non minière de se lancer sur cette activité, même lorsque le prix à la revente est élevé. A ceci s'ajoute la réticence plus ou moins forte des acteurs financiers à s'engager dans un projet de ce type. Dans la littérature, Germeshausen *et al.* (2015) démontrent que l'expérience accumulée et la localisation des actifs sont les principaux facteurs déterminant l'amplitude du pouvoir de marché des entreprises minières, c'est-à-dire la potentielle puissance de l'oligopole. De telles barrières à l'entrée du marché de l'extraction du minerai de fer tendent à relativiser la faible concentration des acteurs en mettant en lumière le potentiel pouvoir de marché important détenu par les entreprises minières existantes et surtout aujourd'hui le *Big 4*. Ce pouvoir est à son maximum en présence d'un monopole ou d'un oligopole coopératif mais peut également exister en présence d'un oligopole non coopératif. Au même titre que la présence de barrières à l'entrée, l'existence d'un pouvoir de marché peut dissuader l'entrée de nouveaux agents économiques.

Le comportement stratégique des firmes via la maîtrise de l'offre

Une offre de minerais qui ne faiblit pas malgré le ralentissement de la demande

Alors que la stratégie du *Big 4* consistait logiquement à augmenter leurs capacités de production pour répondre à la demande chinoise, il semble qu'en cas de ralentissement de la demande, cette stratégie ne soit pas rationnelle lorsque le marché est concurrentiel. Avec un taux d'utilisation des capacités de production de 100%, il est difficilement envisageable de considérer que le *Big 4* s'appuyait sur une stratégie de l'offre pour influencer le prix. En théorie, dans un contexte de forte demande, l'objectif aurait été de ralentir l'approvisionnement en minerai pour faire monter le prix et engranger davantage de profit ¹⁵. Cependant, le ralentissement de la demande chinoise à partir de fin 2010, et encore plus depuis 2014, conjuguée à l'entrée en activité de nouvelles capacités de production ont provoqué une chute du prix du minerai. Alors que cette tendance au niveau de la demande se confirmait, le *Big 4* a poursuivit sa marche en avant en projetant l'ouverture de nouvelles capacités. La plus grande entreprise minière au monde, Vale, a par exemple annoncé l'augmentation de ses capacités de production de 23% par rapport à janvier 2014, afin de les porter à 370 Mt. BHP a également prévu d'augmenter ses capacités dans les mêmes proportions pour les porter à 290 Mt. Enfin, Rio Tinto a investi massivement dans le gisement du Pilbara (Australie) comptant 15 mines. L'entreprise a fait évoluer son site vers une capacité de 360 Mt, soit une hausse d'environ 34% par rapport à 2014. Au-delà du pari sur une augmentation continue de la demande en minerai, le *Big 4* a pleinement tiré avantage de ce contexte où plus l'écart entre la demande anticipée et l'offre potentielle se creusait, plus le taux d'utilisation des capacités de production baissait, et plus le prix du minerai diminuait.

Ceci a eu pour conséquence l'éviction de la concurrence ayant pu prospérer dans les années 2000. Après avoir massivement réduit leurs coûts de production pour

¹⁵Sous réserve que le prix soit non administré et qu'il puisse varier en fonction de l'offre et de la demande de court terme. Or ce ne fut pas le cas sur le marché du minerai de fer avant l'introduction d'un marché spot en 2008.

les porter à 30-40 US\$ par tonne ¹⁶, les membres du *Big 4* peuvent désormais faire face à un prix de marché très bas, tout en engrangeant du profit. Face à eux, la concurrence ne peut que difficilement exister avec des coûts de production qui oscillent entre 60 US\$ par tonne pour des acteurs de taille moyenne comme l'Australien Atlas Iron, et 90-100 US\$ par tonne pour des petits acteurs ou les entreprises minières chinoises (UNCTAD, 2014). La stratégie d'une offre abondante, même non coordonnée, se répercute sur le prix et donc sur la stratégie des entreprises minières marginales. A ce titre, un oligopole non coopératif face à une frange concurrentielle de sidérurgistes, semble donc se justifier.

Le difficile dilemme des entreprises minières marginales

L'abondance de minerai de fer et les perspectives de demande au niveau mondial peuvent laisser présager d'un prix relativement faible pour les prochaines années, où seuls les producteurs les plus importants pourront survivre. En 2014, Western Desert Resources (Australie) ou encore London Mining (Royaume-Uni) ont toutes deux cessé leur activité minière, et d'autres sont en cessation de paiement comme Cairn Hill (Australie) ou Northland Resources (Suède). Au vu du contexte, les firmes minières les plus fragiles ne peuvent plus compter sur l'accumulation de liquidités dont ils ont pu bénéficier en période de prix élevés. Ils n'ont donc qu'une seule alternative : la réduction des coûts de production ou la consolidation.

Pour la première voie, les entreprises procèdent à la fermeture de certains sites, la réduction des effectifs et la coupe dans les investissements. Ce choix de baisse des coûts de production est par ailleurs facilité par la baisse du prix du fret maritime, la baisse du prix du pétrole et pour certaines entreprises, notamment australiennes, la dépréciation de leur monnaie par rapport au dollar. Dans certains cas, les gouvernements peuvent participer au maintien de l'activité *via* différentes aides ponctuelles. C'est le cas de la Chine et plus localement, de l'Australie occidentale qui adopte également ce type de mesures (*e.g.* rabais de 50% sur un an du taux de redevance).

¹⁶Vale, Rio Tinto et BHP ont désormais l'objectif d'atteindre le seuil des 20 US\$ par tonne.

En optant pour la stratégie de consolidation, les entreprises favorisent la concentration du marché en ouvrant la voie à de nouvelles fusions et acquisitions. Ce phénomène est en cours et devrait se poursuivre tant que le prix de marché est aussi bas. La fragilité économique de certaines entreprises minières en font des proies faciles pour les plus gros acteurs, ainsi que pour les investisseurs (*i.e.* les principaux sidérurgistes des pays émergents) cherchant à contrôler tout ou partie de leur approvisionnement. D'autres entreprises choisissent de s'associer et ainsi faire valoir des économies d'échelle pour réduire les coûts de production. La structure du marché du minerai de fer *seaborne* est donc actuellement dominée par un faible nombre d'entreprises. Cette structure oligopolistique pourrait se concentrer encore davantage dans les prochaines années si le prix du minerai reste à un niveau inférieur ou égal à 60 US\$ par tonne. En plus d'une stratégie sur l'offre qui influe indirectement sur le prix, l'oligopole peut également faire valoir son pouvoir de marché et impacter directement le prix du minerai, dont le mode de fixation a évolué suite au choc de demande.

L'émergence du marché spot

Pendant plus de 30 ans, les fournisseurs de minerai et les sidérurgistes pouvaient compter sur une relative stabilité des prix grâce à la négociation annuelle. Un oligopole bilatéral se formait lors des négociations entre d'un côté les acheteurs, Rohstoffhandel (*i.e.* intermédiaire allemand lié à Thyssen), Erzkontor (intermédiaire allemand lié à Salzgitter), Usinor, British Steel Corporation (BSC), POSCO et Nippon Steel, et de l'autre le Big 3 composé de Vale, BHP et Rio Tinto (Sukagawa, 2010). L'ensemble des acteurs, y compris ceux ne participant pas aux négociations, prenaient alors ce prix comme référence pour l'année en cours (hors frais de transport). En revanche, la stabilité de la demande de minerai et le faible taux d'utilisation des capacités de production des entreprises minières ne donnaient à ces dernières qu'un très faible pouvoir de marché face aux sidérurgistes. L'objectif était pour chacune d'entre elles de rentabiliser au maximum les lourds investissements consentis pour l'achat et l'exploitation des mines. La stabilité du marché fut

alors bouleversée dans les années 2000 où, pour répondre au choc de demande, ces firmes ont souhaité négocier des augmentations de prix afin de réaliser les investissements nécessaires, faute de quoi elles se trouveraient en incapacité d'augmenter leur offre. Progressivement, le prix a alors reflété les conditions de marché. Dans ce nouveau contexte, non seulement le *Big 3* pouvait asseoir sa domination sur les entreprises minières marginales (*i.e.* qui restaient toujours *price-taker*), mais il pouvait aussi faire valoir son nouveau pouvoir de marché face à de nombreux sidérurgistes dépendants de l'accès au gisement de minerai de fer (*i.e.* les débouchés étant assurés grâce à la forte demande, l'influence des entreprises minières dans la fixation du prix était dès lors plus importante).

Suite à la crise, le mode de fixation fut critiqué pour sa rigidité car il ne reflétait pas encore suffisamment les conditions de marché (Musacchio *et al.*, 2010). À l'image de ce qui s'est passé dans les années 80 avec l'aluminium ou dans les années 2000 avec le charbon, le prix du minerai de fer s'est alors progressivement fixé sur un marché spot. La contractualisation annuelle de ce prix cohabitait donc avec les transactions basées sur le prix spot (incluant ou non le prix du Fret selon la cotation choisie), mais cette cohabitation s'est avérée très brève (Warell, 2014). Comme l'illustre la Figure I.9 (source des données : INSEE), le prix est resté annuellement stable sur toute la période 2002-2008 où les variations successives l'on fait passé de 12 US\$ par tonne en 2002 à plus de 60 US\$ par tonne en 2008, soit une hausse de 500% en six ans !

Malgré l'hostilité d'Eurofer qui craignait la volatilité de ce nouveau système, le marché spot s'est enraciné comme référence de prix dans les transactions. À titre d'exemple, un benchmark trimestriel a été mis en place en 2010 ¹⁷ mais restait basé sur la moyenne des prix spot des quatre mois précédents, et non sur une négociation entre acteurs du secteur (Blas, 2010). Ce type de changement structurel s'étant déjà produit dans les années 70 et 80, il existe une littérature mettant en lumière les conséquences d'un changement de régime sur les prix (Slade

¹⁷Le benchmark annuel tel qu'il était pratiqué, a *de facto* été abandonné cette même année (Warell, 2014)

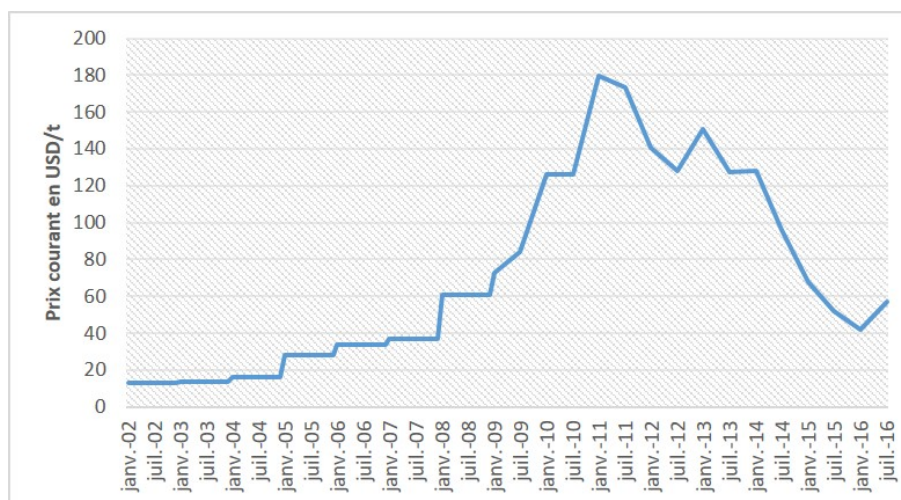


FIGURE I.9 – Evolution du prix du minerai de fer en US\$/t (62% Fe, Port de Tianjin)

(1989); Figuerola-Ferretti et Gilbert (2001)). En comparant les prix de marché (*i.e.* suite à l'introduction des métaux au London Metal Exchange) et les « prix-producteurs » (*i.e.* nés d'une négociation entre acteurs du secteur) Slade (1989) démontre d'une part une meilleure stabilité des prix producteurs sur la période 1970-1980, et d'autre part une augmentation de la volatilité des prix lorsque le régime de prix de marché fut dominant. En revanche, Figuerola-Ferretti et Gilbert (2001) estiment que le deuxième élément de l'analyse de Slade (1989) est biaisé par l'inclusion de l'argent dans son périmètre d'étude, dont le prix de marché fut l'objet de manipulation. Ils nuancent également les conclusions de Slade car sur le long terme et en étendant la période considérée, la plus forte volatilité du prix de marché par rapport au prix-producteur tend à diminuer. Dans une autre étude, Slade (1991) identifie l'impact de la concentration du marché et démontre empiriquement *via* l'indice HHI, que plus le marché est concentré plus les prix sont stables. Concernant plus spécifiquement le minerai de fer, d'après Warell et Lundmark (2008), les fusions et acquisitions qui se sont opérées entre les entreprises minières ont eu un impact positif sur le prix. La fusion entre Rio Tinto et North Ltd a, par exemple, conduit à une augmentation de 5.8% du prix du minerai et celle entre Vale et Caemi, une hausse de 7%.

Warell (2014) montre également la plus forte volatilité du prix après l'inclusion du marché spot, mais nuance ce premier constat en prenant en compte la volatilité du coût du transport, qui influence fortement le phénomène initialement observé. Le lien de causalité entre volatilité et marché spot n'est donc pas si évident car son amplitude peut être influencée par d'autres paramètres. Dans cette même étude, Warell (2014) identifie également le PIB chinois comme étant le principal déterminant aux variations du niveau de prix. Ceci semble donc valider l'absence d'influence directe de l'oligopole sur le prix de marché.

4.3 La remise en cause de l'oligopole depuis 2014 ?

Le rôle du gouvernement et du CISA dans la demande chinoise

Les règles du marché ne sont pas les seules à organiser la sidérurgie chinoise. Le gouvernement central y prend toute sa part non seulement *via* la prise de participation majoritaire dans une grande majorité des groupes sidérurgiques, mais également dans la constitution d'entités et de mécanismes économiques et réglementaires pour les relations avec l'extérieur. Avant l'entrée de la Chine dans l'OMC en 2001, les autorités n'interviennent que très peu sur le marché et laissent les sidérurgistes contracter avec les entreprises minières pour leur approvisionnement. Le minerai chinois prend alors toute sa part dans l'approvisionnement des sites sidérurgiques du pays. Pourtant, les enjeux sont importants. Avec une demande d'acier aussi forte et des gisements de minerai de fer aussi pauvres en qualité, la dépendance aux importations s'annonce relativement forte dès le début des années 2000, même si le benchmark annuel alors en vigueur permet une visibilité sur le prix du principal input des sidérurgistes. A partir de 2003, le gouvernement chinois change de politique et nomme BaoSteel comme représentant des sidérurgistes chinois. Pendant plusieurs années, BaoSteel prend donc place à la table des négociations avec pour objectif de contenir la hausse du prix du minerai. Cette stratégie est un échec. La déconcentration du secteur et l'hétérogénéité des acteurs domestiques donnent un pouvoir de marché important aux entreprises

minières. Certains sidérurgistes, sous contrôle des autorités locales, n'hésitent d'ailleurs pas à contracter directement avec des fournisseurs sans se préoccuper des besoins des autres sidérurgistes chinois (Liu, 2011).

La Chine paye au prix fort ses besoins en acier des secteurs de la construction et de l'industrie manufacturière. En 2009, un nouvel acteur entre dans le paysage sidérurgique mondial pour remplacer Baosteel et tenter de contenir la hausse du prix du minerai : le CISA. Ce changement de représentant dans la délégation chinoise n'obtient pas les effets escomptés. La dispersion des sidérurgistes est trop importante et le CISA ne représente que les plus gros sidérurgistes pouvant bénéficier des bienfaits de contrats tarifaires de long terme. Les petites et moyennes entreprises, représentant la majorité des sidérurgistes, n'ont que très peu d'expérience en matière d'échanges internationaux et éprouvent d'importantes difficultés pour planifier leur production et donc leurs besoins en minerai. Par conséquent, elles sont une majorité à s'orienter vers le marché spot, qui progressivement se développe et où le prix atteint en 2013, 120 US\$ par tonne.

Le passage du statut de spectateur à acteur sur le marché mondial

La solution pour sortir de cette dépendance semble alors insoluble pour les autorités chinoises. Les anciennes mines sur le territoire sont trop chères à exploiter puis politiquement et socialement difficiles à fermer de manière officielle. Les gisements australien et brésilien sont de très bonne qualité. Avec un coût du fret aussi peu élevé, le recours à ces entreprises minières est inévitable pour le gouvernement chinois qui entend améliorer la compétitivité de ses sites sidérurgiques et y développer de nouveaux débouchés à plus forte valeur ajoutée. Le prix aussi élevé du minerai de fer se pose alors comme un véritable problème pour les autorités – de 2010 à fin 2013, le minerai n'est jamais descendu à moins de 120 US\$ par tonne et à même grimper à près de 180 US\$ par tonne en 2011 (en valeur nominale). Au fil des mois de 2013, les stocks de minerai s'accumulent sur les ports chinois, fluctuant autour des 80-85 Mt sur les derniers mois alors qu'en moyenne les importations s'élèvent à 70 Mt par mois depuis janvier de cette même année. Cette

accumulation des stocks confirme le fléchissement de la demande chinoise entamé quelques mois auparavant et se révèle comme le signe annonciateur d'un potentiel retournement du marché. Après dix années marquées par un appétit insatiable pour le minerai de fer, la Chine marque en effet le pas suite à un ralentissement de la demande en provenance des secteurs fortement consommateurs d'acier. Cette contraction de la demande s'illustre notamment dans la baisse du PIB ramené à 7.4% en janvier 2014 – contre 7.7% en 2013, 8.1% en 2012 et 9.4% en 2011 – et dans la baisse de la part du secteur industriel dans le PIB évaluée à 42.6% du PIB – contre 43.7% en 2013, 45% en 2012 et 46.1% en 2011 . Une tendance qui se poursuit en 2014 mais n'explique pas entièrement l'ampleur du retournement où deux stratégies se cumulent.

Côté offre, les entreprises minières poursuivent leur marche en avant tout au long de 2013 et 2014 en continuant d'investir massivement dans de nouvelles capacités de production alors que la Chine semble de moins en moins en mesure d'absorber les importations, notamment en provenance d'Australie en 2014. Avec 155 Mt, FMG dépasse ses objectifs de production. Vale, Rio Tinto et BHP atteignent également des records de production sur le troisième semestre 2014. Parallèlement côté demande, outre le ralentissement des secteurs consommateurs d'acier évoqué précédemment, les sidérurgistes anticipent l'accès facile à la matière première et commencent donc à laisser les stocks se former au niveau des ports chinois pour produire à flux tendus. De plus, les petits et moyens sidérurgistes commencent à se plaindre des restrictions de conditions d'emprunts des banques qui elles, s'inquiètent de la faible rentabilité de ces sites. Dans ces conditions, le rôle joué par le gouvernement chinois est central. Non seulement il est à la tête des principaux sidérurgistes du pays et maîtrise donc cette politique d'accumulation des stocks, mais il entend également limiter la surchauffe de l'économie chinoise *via* une réorientation plus profonde de l'économie. Un souhait qui se manifeste notamment par la hausse de la diversification des débouchés. En particulier, à l'instar de leurs concurrents internationaux, ils développent une stratégie vers les segments à plus forte valeur ajoutée à destination de la consommation, et non plus essentiellement

à destination de l'investissement. Cette tendance confirme la baisse de l'intensité de consommation d'acier. Une réorientation à moyen terme qui a néanmoins des répercussions importantes à court terme. De 136 US\$ par tonne en novembre 2013, le prix tombe sous les 93 US\$ par tonne six mois après. Cette chute se poursuit tout au long de l'année 2014. Au premier trimestre, la filière fait face à une baisse de 12%, au second une baisse de 20%, au troisième, une baisse de 17% et au dernier une baisse de 10%. Le prix va même jusqu'à descendre sous le seuil de 50 US\$ par tonne en avril 2015. Au vu des prévisions, les entreprises minières et analystes du marché s'attendaient effectivement à une baisse des prix, mais c'est bien son ampleur qui surprend. L'abondance du minerai et la stratégie du gouvernement chinois ont donc cassé un cycle de prix dont seuls les firmes minières profitaient.

L'avènement d'un monopsonne contrarié ?

La rupture du cycle présente plusieurs avantages pour les autorités chinoises. L'écroulement du prix du minerai de fer permet tout d'abord aux sidérurgistes, qu'ils soient d'ailleurs chinois ou étrangers, d'être plus profitable au détriment des entreprises minières. De ce fait, le pouvoir de marché se trouve mieux équilibré, d'autant que l'oligopole continue d'investir dans de nouvelles capacités que les firmes seront nécessairement amenées à rentabiliser. L'autre avantage pour le gouvernement chinois se situe sur le marché domestique. La faiblesse du prix du minerai, sous couvert d'une offre extérieure excessive, amène certains sites miniers anciens et parfois illégaux, à devoir fermer, tant leur survie dans un tel contexte est impossible. Enfin, les nouvelles conditions de marché créent une fragilité importante chez les entreprises minières marginales en Afrique, Australie ou en Inde, permettant aux autorités chinoises d'investir dans des actifs hors de ses frontières, et réduire donc sa dépendance aux importations en provenance de l'oligopole.

Ces événements marquent une nouvelle étape pour la filière sidérurgique mondiale. Aujourd'hui, c'est bien le gouvernement chinois qui maîtrise le prix du minerai. Cette configuration vaut d'une part pour les entreprises minières en amont de la filière et d'autre part pour les sidérurgistes internationaux, trop hétérogènes sur

le plan économique et géographique pour pouvoir exercer une quelconque influence. Sur le marché *seaborne*, un seul demandeur face à un faible nombre d'offres est caractéristique d'un monopsonne contrarié, selon la classification des structures de marché de Stackelberg (1934). Il ne semble donc pas irréaliste de considérer que le niveau très élevé du prix du minerai n'ait été qu'un épisode conjoncturel lié à la demande chinoise, mais que structurellement, le prix du minerai reste à un niveau plus faible et que la Chine soit bel et bien au cœur d'un monopsonne contrarié.

4.4 Le monopsonne contrarié : une structure de marché entre l'oligopole et le monopsonne

Sur le plan théorique, l'analyse de la confrontation entre un faible nombre d'offres et un seul demandeur (*c.f.* Table I.2), semble inexistante. En effet, le monopsonne contrarié ne fait l'objet d'aucune référence dans la littérature économique. En dehors de la concurrence pure et parfaite, les principales structures de marché non concurrentielles analysées sont le monopole et l'oligopole, lorsque la demande est composée d'un grand nombre d'acteurs. En revanche, l'hypothèse d'une demande plus concentrée est relativement moins abordée et la cas échéant, l'attention semble essentiellement portée sur le monopsonne.

TABLE I.2 – Classification des structures de marché

Offreurs Demandeurs	Un seul	Faible nombre	Grand nombre
Un seul	Monopole bilatéral	Monopsonne contrarié	Monopsonne
Faible nombre	Monopole contrarié	Oligopole bilatéral	Oligopsonne
Grand nombre	Monopole	Oligopole	Concurrence Pure et Parfaite

Outre ces traditionnelles structures de marché dont l'analyse théorique s'illustre par de nombreux cas empiriques, nous mettons donc en évidence au cours de ce chapitre le passage d'un oligopole bilatéral à un potentiel monopsonne contrarié sur le marché du minerai de fer. Il semble qu'une telle structure soit également obser-

vable sur les marchés publics (*e.g.* eau, déchets ménagers) . Une commande pour des infrastructures de transport ou pour le renouvellement d'une flotte d'avion ou autres, est, par exemple, un cas typique de monopsonne contrarié. L'Etat ou la collectivité est confrontée à un faible nombre d'offreurs compte tenu de la spécificité du produit ou du service qu'elle souhaite obtenir. Dans ce cas, il n'est d'ailleurs pas rare de retrouver des cas d'entente parmi les offreurs ¹⁸.

Sur le marché de l'extraction, la concentration de l'offre autour de quelques firmes minières permet à ces dernières d'avoir une influence sur le prix de marché soit directement, soit indirectement *via* une stratégie basée sur les quantités. La Figure I.10 (graphique gauche) illustre l'équilibre d'un marché où l'offre est non concurrentielle face à une demande composée d'un grand nombre d'acteurs. La détermination des quantités optimales résulte de l'égalité entre le coût marginal (Cm) et la recette marginale (Rm). Le prix est alors défini grâce à la courbe de demande et permet au monopole (ou à l'oligopole) d'écouler toute sa production. Par rapport à un marché en concurrence pure et parfaite où personne n'a d'influence sur le niveau de prix, une perte d'efficacité apparaît (zone rouge). Ces pertes illustrent l'aptitude des firmes minières (dans le cas d'un oligopole) à déterminer un prix de la matière au-dessus de son niveau concurrentiel. Ce pouvoir de marché est d'autant plus élevé, et les pertes sèches d'autant plus fortes, que l'élasticité-prix de la demande est faible. En effet, les firmes peuvent directement augmenter le prix, ou indirectement *via* les quantités, sans trop décourager la demande. A l'inverse, une élasticité-prix élevée désincite les firmes à adopter une telle stratégie, c'est à dire à bénéficier pleinement de leur pouvoir de marché. Plus cette élasticité est forte et plus l'écart entre le prix de marché et le cout marginal sera faible.

¹⁸En 2006, l'Autorité de la Concurrence avait par exemple sanctionné 34 entreprises du secteur du bâtiment pour « entente généralisée sur les marchés publics d'Ile-de-France »(source : *Décision 06-D-07 du 21 mars 2006 relative à des pratiques mises en œuvre dans le secteur des travaux publics dans la région Ile-de-France*). L'année suivante, huit ententes ont été condamnées par l'Autorité à l'occasion de marchés publics et le total des sanctions s'est élevé à 66 millions d'Euros (source : DGCCRF). En 2018, trois entreprises martiniquaises ont également été condamnées pour entente (source : *Décision 18-D-02 du 19 février 2018 relative à des pratiques mises en œuvre dans le secteur des travaux d'entretien d'espaces verts en Martinique*).

Pour le cas du monopsonne, la demande est concentrée et fait face à une offre composée d'un grand nombre de firmes. Dans la maximisation de son profit, le monopsonne égalise sa dépense marginale (Dm) consacrée à l'achat de facteurs nécessaire à la production, à la recette marginale (Rm) procurée par cette production sur un marché concurrentiel en aval. Les quantités de l'équilibre étant déterminées, le niveau de prix s'ajuste alors selon l'offre de facteurs. Ainsi, comme l'illustre la zone rouge sur la Figure I.10 (graphique de droite), l'équilibre du monopsonne génère également des pertes sèches, dont l'amplitude dépend de l'élasticité-prix de l'offre. Le pouvoir de monopsonne (*i.e.* son aptitude à bénéficier d'un prix inférieur au prix concurrentiel) est alors d'autant plus élevé que l'offre est peu élastique. En effet, la diminution des quantités offertes suite à une baisse du prix ne serait pas instantanée si l'élasticité-prix de l'offre est faible. A l'inverse, le pouvoir de monopsonne serait limité dans le cas où les offreurs ajusteraient instantanément leurs quantités suite à un prix plus faible.

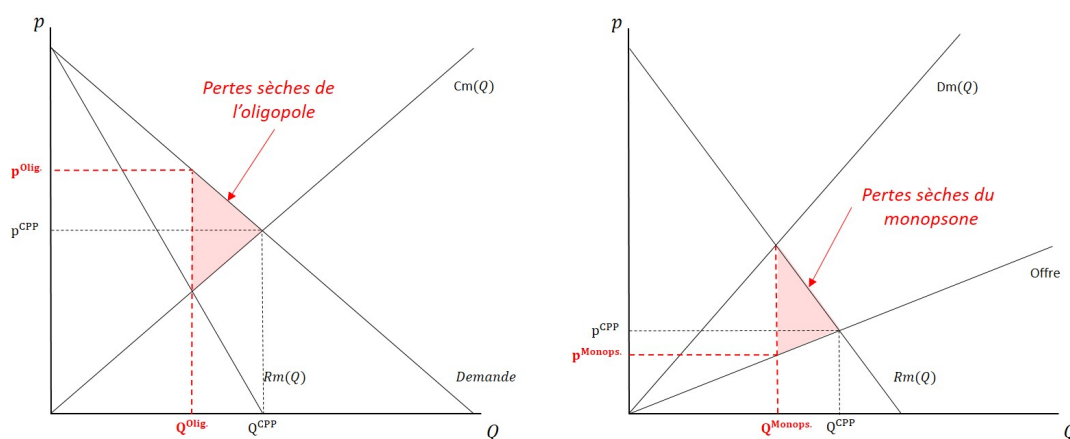


FIGURE I.10 – Equilibre et pertes sèches de l'oligopole (gauche) *vs* Equilibre et pertes sèches du monopsonne (droite)

Sur le marché du minerai de fer, une situation où l'oligopole de firmes minières et le monopsonne chinois feraient respectivement face à un grand nombre d'acteurs aboutirait à ce que chacun exerce pleinement son pouvoir de marché. Or, il semble donc que depuis quelques années le pouvoir de marché historique de l'oligopole se confronte au pouvoir d'un monopsonne. *A priori*, à l'équilibre, cette structure de

marché aboutit à une quantité de minerai plus faible qu'en concurrence pure et parfaite. L'effet sur le prix, et donc l'amplitude des pertes sèches, semble indéterminé et dépend de la confrontation entre les pouvoirs de marché de l'oligopole et du monopsonne, *in fine*, du niveau des élasticités prix de l'offre et de la demande. En cherchant des substituts au minerai de l'oligopole et en voulant maîtriser son approvisionnement *via* le rachat de gisement, notamment en Afrique, ou de firmes minières marginales, la Chine tend à augmenter l'élasticité prix de la demande. Ceci a pour conséquence la diminution du pouvoir de marché de l'oligopole. Du côté de l'offre, à défaut d'une vague de privatisation des sidérurgistes chinois, la solution pour les principales firmes minières réside dans l'apparition de nouveaux marchés, dont le potentiel permettrait de nuancer la domination de la demande chinoise. En attendant, si les principales firmes minières ont toujours individuellement l'objectif de dominer l'offre de minerai, elles sont collectivement incitées à collaborer notamment pour limiter l'arrivée de nouveaux entrants sur le marché.

5 Conclusion

L'histoire de la sidérurgie est marquée par une succession de périodes de croissance et de récession. Cette cyclicité d'abord régionale, a évolué avec le développement des échanges internationaux et la nécessité de répondre à des besoins industriels et d'aménagement du territoire, piliers du développement économique moderne. Au cœur de l'urbanisme et de ses immeubles, des différents moyens de transport et de leurs infrastructures, la production d'acier agit comme un véritable moteur de croissance. En plus de dresser le portrait d'un secteur d'activité en pleine mutation, notamment suite à l'arrivée de la Chine sur la scène internationale, l'objectif de ce chapitre a consisté à analyser l'évolution de la structure de marché. Le chapitre met ainsi en lumière plusieurs éléments de conclusion.

Tout d'abord, sur le marché mondial, un phénomène analogue s'est réalisé pour les sidérurgistes et pour les entreprises minières. Alors que la vague de fu-

sions et acquisitions aurait dû renforcer la concentration des deux marchés et être potentiellement dommageable pour le consommateur, les effets ont été annulés par le choc de demande. Pour la sidérurgie, la compensation s'est faite grâce à l'entrée de nouveaux acteurs, en particulier chinois, qui, en l'espace de quelques années, se sont installés parmi les plus grands sidérurgistes mondiaux (en volume de production). Pour les entreprises minières, le choc fut tellement important et inattendu que même les producteurs marginaux ont profité de cette demande nouvelle. Malgré un retard lié à leur manque de flexibilité de court terme, ils ont profité du surplus de demande laissé par le *Big 3* et lié à l'utilisation à 100% de leurs capacités de production. Les fusions et acquisitions n'ont donc pas eu l'effet de concentration du marché escompté, compte tenu de l'élargissement du marché en parallèle.

De plus, au regard de la concentration de l'offre à l'export, des différentes barrières à l'entrée et du comportement stratégique des principales firmes minières depuis quelques années, il semble qu'un oligopole se soit formé et progressivement activé. Deux stratégies se sont succédées en l'espace d'une décennie en mettant en évidence un potentiel pouvoir de marché de l'oligopole. La stratégie prix s'est tout d'abord instaurée dans le cadre du benchmark annuel pour le prix du minerai de fer. Côté offre, seul le *Big 3* prenait part aux négociations mais un seul prix était défini pour l'ensemble des acteurs. Durant cette période, ces trois firmes dominantes exploitaient ses capacités de production à 100% et il semblait dès lors difficilement concevable de mettre en place une stratégie de l'offre. L'objectif principal était l'ouverture de nouvelles capacités. Quelques années plus tard, la tendance s'est inversée. L'instauration puis le développement du recours au marché spot en 2010 n'a plus permis au *Big 3* (désormais *Big 4*) d'intervenir directement sur le niveau de prix. En revanche, la baisse du taux d'utilisation de capacités de production liée à la mise en activité des nouvelles structures, couplé au ralentissement de la demande ont provoqué une chute du prix du minerai et donc diminué la rentabilité des entreprises minières. Dans ce contexte, ces dernières ont continué d'abonder le marché en minerais et de prévoir l'ouverture de nouvelles capacités.

Cette stratégie de l'offre excessive en dépit d'un ralentissement de la demande, a renforcé la chute du prix et a permis au *Big 4* d'évincer la concurrence en se positionnant sur un marché de long terme où les prix seront probablement plus faibles et donc les marges plus réduites.

Côté demande, faisant suite à une modification plus structurelle de leur économie, les autorités chinoises ont participé à la chute du prix du minerai en orientant une production sidérurgique vers des produits à plus forte valeur ajoutée. Alors que pendant des années, les sidérurgistes étaient très hétérogènes face à l'approvisionnement des entreprises minières, il semble que le retournement du marché entamé en 2011 et surtout renforcé fin 2013, ait consolidé la demande chinoise autour d'un seul acteur, le pouvoir central. Représentant plus de 50% de la production sidérurgique et surtout plus de 65% des importations en minerai (en volume), la Chine s'est installée comme l'acteur unique à l'origine des variations des conditions de marché, et notamment du prix du minerai de fer, face à un faible nombre d'offres. Dans ce nouveau contexte, il semble que la structure de marché a progressivement évolué en passant d'un oligopole à un monopsonne contrarié à partir de 2014.

Sur le long terme, le ralentissement de la croissance chinoise devrait se coupler avec une plus grande disponibilité de la ferraille. Cette transition devrait renforcer le ralentissement de la demande de minerai. Si à l'échelle mondiale produire de l'acier avec cette matière première vierge reste majoritaire (75% en 2016), dans certains pays comme aux Etats-Unis ou en Italie, les entreprises minières ont perdu leur position dominante au bénéfice des recycleurs. Une concurrence qui peut d'ailleurs s'opérer pour l'approvisionnement d'autres matières premières.

Annexes I

I.A Fabrication de l'acier et typologie des principaux produits

Qu'est-ce que l'acier ? « L'acier, c'est du fer additionné de carbone, depuis un taux proche de 0% correspondant à des traces infimes de carbone, jusqu'à 2% »¹⁹. Au-delà de 2%, c'est de la fonte. Moins il y a de carbone, plus l'acier est déformable ; plus le carbone est présent, plus l'acier est dur, résistant mais aussi cassant. Les sidérurgistes parviennent à concilier déformation et résistance en remplaçant le carbone par de faibles quantités d'éléments d'alliages tels que le manganèse, le chrome, le molybdène, le vanadium, etc. ainsi qu'en exécutant des traitements thermiques ultérieurs pour modifier la structure cristalline de l'acier. L'acier s'oxyde naturellement (rouille) et pour le protéger il est souvent revêtu de zinc (galvanisation), ou alors allié avec du chrome et du nickel (aciers inoxydables) auquel on retire le carbone excédentaire en le brûlant avec de l'oxygène dans un convertisseur ²⁰.

I.A.1 Les procédés de production

Il existe trois méthodes pour produire de l'acier ²¹ :

¹⁹Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux (A3M)

²⁰La majorité des éléments et des données présentées dans cette note technique provient d'un entretien mené le 12 mai 2015 auprès de Marcel Genêt, Président-fondateur de Laplace Conseil et spécialiste du marché de la sidérurgie mondiale.

²¹Une ancienne méthode appelée « Martin Siemens » ou « Open Herath Furnace » existait jusqu'il y a quelques décennies mais a pratiquement disparue de nos jours (moins de 0.5% en 2016).

- **La filière intégrée** (filière primaire, de première fusion, ou dite « oxygène ») représentait au niveau mondial 74% en 2016 (World Steel Association). Dans la première étape de ce procédé, le minerai de fer préalablement calibré et préparé est réduit par du charbon à coke ²² dans un haut fourneau pour obtenir de la fonte liquide à une température de l'ordre de 1250 ° C. Dans une seconde étape, la fonte liquide est transformée en acier dans un convertisseur à oxygène, à l'intérieur duquel de la ferraille peut être incorporée. L'oxygène injecté dans le convertisseur permet de brûler le carbone excédentaire de la fonte pour former l'acier liquide ;
- **La filière électrique** (filière secondaire ou filière de seconde fusion) représentait au niveau mondial environ 22% en 2016. L'acier est produit principalement à partir de ferrailles fondues dans un four à arc électrique. Presque tous les aciers peuvent être produits par cette technologie, cependant les nuances d'aciers les plus exigeantes nécessitent des ferrailles exemptes d'impuretés, en particulier de cuivre résiduel ;
- **La filière à réduction directe** est plus récente. Elle représentait environ 4% du total en 2016 mais progresse rapidement. Dans ce procédé le minerai de fer est réduit par du gaz naturel pour obtenir une « éponge de fer » qui est ensuite fondue dans un four électrique classique en complément ou en substitution de ferrailles. Cette méthode n'est utilisée que dans les pays qui disposent de gaz naturel bon marché (moins cher que le coke). Elle est plus performante, diminue les rejets de CO_2 et réduit le coût d'investissement.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons uniquement aux deux premiers procédés, beaucoup plus répandus parmi les sidérurgistes.

Quel que soit le procédé utilisé pour obtenir l'acier liquide brut, celui-ci est ensuite affiné dans d'autres fours spéciaux pour ajuster la teneur en éléments d'alliage puis coulé dans des machines de coulée continue où il est solidifié et formé en demi-

²²Bien que ce type de charbon soit considéré comme matière première critique par l'Union Européenne, les enjeux liés à cette matière ne sont pas traités dans le cadre de cette thèse.

produits (billettes, blooms et brames). Ces demi-produits sont ensuite soit transformés en produits finis dans des laminoirs pour obtenir des produits longs comme les fils, barres, rails, et des produits plats comme les tôles et plaques. Concernant ces derniers, une étape supplémentaire de laminage à froid et de revêtement d'une couche superficielle protectrice de zinc ou d'étain peut être réalisée pour obtenir l'épaisseur finale souhaitée ainsi qu'une protection immédiate des tôles. En valeur absolue, l'investissement dans l'outil de production sidérurgique est conséquent mais diffère d'une filière à l'autre.

Concernant la filière oxygène, l'ensemble des outils comprenant l'usine d'agglomération, la cokerie, les hauts fourneaux, les convertisseurs et des lamineurs à chaud puis à froid forment un site intégré. On y réceptionne le minerai de fer et le charbon à coke pour la fabrication de produits semi-finis et/ou finis dans une multitude de formes et d'alliages. Un haut fourneau, où l'on extrait le fer de son minerai, coûte plusieurs centaines de millions d'Euros et est l'outil de production le plus important et le plus onéreux de la chaîne de production. Sa flexibilité est limitée car l'arrêt entraîne des dégradations importantes et son redémarrage est long et délicat. Les entreprises qui ont des sites intégrés éprouvent des difficultés à amortir les frais engagés dans de tels investissements. De plus, ces sites sont fortement pourvoyeurs d'emplois et leur mise à l'arrêt, provisoire ou définitive, est généralement très dommageable pour le tissu économique local. Le pouvoir politique et syndical associé à un site sidérurgique est dès lors très fort, en particulier en Europe.

Concernant la filière électrique, l'investissement coûte relativement moins cher qu'un site intégré complet. Les fours électriques sont de plus petite capacité et sont plus flexibles car ils mettent moins de temps à redémarrer en cas de coupure. Cette flexibilité permet au sidérurgiste de s'adapter plus facilement à la cyclicité de l'activité. Les usines électriques, ou *mini-mills*, sont plus dispersées sur le territoire car il est préférable de se rapprocher du gisement de ferrailles et/ou des clients finaux à la différence des sites intégrés où la proximité du littoral est privilégiée pour l'approvisionnement en minerai et en charbon à coke. Moins in-

tensives en facteur travail, ces unités permettent néanmoins de créer des filières de récupération à dimension locale ou régionale.

I.A.2 Typologie de produits sidérurgiques

Produits longs et plats

Les produits finis peuvent être classés soit dans la catégorie des produits plats (tôles, plaques), soit dans la catégorie des produits longs (barres, rails, fils). Il est également d'usage de distinguer les tubes qui peuvent entrer dans l'une ou l'autre des catégories. Les tubes soudés seront considérés comme produits plats et les tubes sans soudure comme produits longs.

Aujourd'hui, les produits longs sont majoritairement produits à partir de ferrailles, c'est-à-dire issus de la filière électrique, alors que les produits plats sont majoritairement produits à partir de minerai, c'est-à-dire en provenance de la filière oxygène. Il n'existe toutefois pas de freins techniques à la production de produits plats à partir de la filière électrique (*e.g.* : Nucor aux Etats-Unis) ou de production de produits longs à partir de la filière oxygène. Le choix des sidérurgistes pour produire tel ou tel produit avec tel ou tel procédé provient uniquement de considérations historiques, stratégiques et économiques – ces trois dimensions étant intimement liées les unes aux autres.

Aciers carbone, spéciaux (faiblement alliés) et fortement alliés

Cette typologie différencie les aciers selon leur niveau d'alliage possible.

- **Les aciers carbones** peuvent être des produits plats ou longs. Fabriqués à partir de la filière oxygène ou électrique, ils contiennent du carbone comme principal élément d'alliage à hauteur d'un taux maximum de 2%. Ces produits peuvent également contenir d'autres éléments mais à une teneur relativement faible. Les aciers carbones représentent environ 95% des aciers fabriqués dans le monde et peuvent constituer des produits à faible valeur ajoutée ou à forte valeur ajoutée.

- **Les aciers faiblement alliés** (dits « spéciaux ») sont presque uniquement des produits longs ronds et fabriqués quasi exclusivement *via* la filière électrique. Ces produits subissent de fortes flexions et torsions dynamiques. Pour ce faire, des métaux d'alliage en teneur maximales de 4% sont ajoutés afin d'obtenir des propriétés désirées de résistance et de résilience. Parmi cette classe de produits il y a des axes, pistons, engrenages ou encore des fils.
- **Les aciers fortement alliés** ne rouillent pas et sont fabriqués quasi exclusivement *via* la filière électrique. Ces aciers peuvent être plats ou longs et les principaux sont les inoxydables dont la composition contient du chrome à hauteur de 18% minimum et dans des proportions variables du nickel et éventuellement du molybdène.

Par ailleurs, il existe un très grand nombre de nuances et d'alliages possibles selon les propriétés de l'acier désirées par le client final. Pour cette raison, les productions d'aciers spéciaux, et *a fortiori* d'acier fortement alliés, sont quantitativement de plus petite taille et nécessitent donc des unités de production plus petites. Ainsi, l'utilisation de la filière électrique est privilégiée pour ce type de produits.

Aciers marchands (ou « commodités ») et aciers de spécialité

A la différence des trois typologies précédentes, les aciers marchands et de spécialité n'ont pas de définitions techniques propres telle qu'elles pourraient exister dans des cahiers des charges ou dans la législation. Les commodités sont considérées comme des produits non différenciables car la majorité des sidérurgistes maîtrisent leur conception. Ce sont des produits à faible marge, dont le prix est volatil et dont les acheteurs sont peu fidèles compte tenu du degré de concurrence prétendu entre les producteurs. On compte parmi les commodités, la plupart des aciers inoxydables (ou aciers fortement alliés). Inversement, les aciers de spécialité – et non spéciaux – représentent des produits dont la conception est maîtrisée par une seule entreprise

grâce à son savoir-faire spécifique et une stratégie de différenciation qui lui permet de se distinguer. Les aciers de spécialité présentent une marge plus importante et sont achetés par des clients plus fidèles. Ils représentent moins de 1% du volume total alors que les commodités représentent plus de 85%. Par ailleurs, une partie de la production sidérurgique (14%) présente des caractéristiques hybrides entre les deux appellations. Maîtrisés par plusieurs sidérurgistes, ces produits ne sont pas pour autant considérés comme des commodités en raison d'un certain savoir-faire qu'il est nécessaire de posséder. Cependant, les aciers de spécialité – et *a fortiori* les produits « hybrides » – tendent de plus en plus à être des commodités en raison des transferts de technologie et plus globalement du progrès technique. L'intérêt de tous les sidérurgistes est de se positionner sur les segments à plus forte valeur ajoutée. Dans cette situation, la concurrence potentielle devient extrêmement forte et le marché des aciers de spécialité s'avère dès lors un marché contestable. Les sidérurgistes font ici face à des clients très puissants comme les entreprises automobiles ou aéronautiques. Ces clients ont des besoins très spécifiques en termes de qualité de produits et de délais. A ce titre, le pouvoir de marché concernant les aciers de spécialité se situe donc clairement du côté des clients. Cette structure de marché est marquée par un monopsonne où le client final fait face à de multiples potentiels offreurs cherchant à se démarquer sur la qualité du service qu'ils pourraient associer à la vente du produit. Paradoxalement les commodités, maîtrisées par un plus grand nombre de sidérurgistes, constituent un marché potentiellement moins concurrentiel en raison de la faible valeur ajoutée du produit et donc de sa faible propension à voyager. La dimension locale est prégnante pour ces produits. Des intermédiaires appelés « marchands », se portent acheteurs des commodités en grandes quantités puis les revendent aux clients finaux, en particulier dans le secteur de la construction. La plus faible concurrence pour les commodités par rapport aux aciers de spécialité ne signifie pas pour autant l'absence de concurrence. A une échelle locale mais aussi internationale, les sidérurgistes s'efforcent donc d'améliorer leur compétitivité prix, seule variable pour un type de produit que tous les concurrents maîtrisent. Le coût du transport est ici une variable impor-

tante à prendre en compte. Plus le rapport entre le coût du transport et le prix de la commodité est élevé, moins il est intéressant pour le sidérurgiste de conquérir le marché en raison d'une marge potentielle trop faible. Sur ce marché concurrentiel, le prix de l'acier est régional et dépend notamment de la composition et donc de la qualité de l'acier faisant l'objet de la transaction. Une part variable relative à la négociation et liée à la logistique peut également faire varier le prix d'un marché à un autre. De même, en raison de mesures protectionnistes aux frontières adoptées par certains pays, le prix de l'acier peut être renchérit d'environ 100 US\$ par tonne par exemple sur le marché domestique américain, et d'environ 50 US\$ par tonne par exemple sur le marché européen. Au regard des proportions préalablement cités, lorsque le marché de la sidérurgie est évoqué ci-après, cela concerne donc essentiellement ce qui est nommé usuellement les commodités (85%).

I.B L'offre sidérurgique aujourd'hui

I.B.1 Les acteurs globalisés

Premier producteur sidérurgique mondial avec 97 Mt en 2017, ArcelorMittal illustre le mieux cette position d'entreprise globalisée, tant elle domine très nettement la sidérurgie mondiale sur les tonnages produits. Né de multiples fusions et acquisitions au cours des années 1990-2000, le groupe choisit la croissance externe pour se développer et bénéficier d'économies d'échelle. Du Caucase à l'Europe de l'est, la famille Mittal oriente d'abord ses investissements, financés par de grands emprunts internationaux, vers des usines obsolètes qu'il entend relancer en produisant des produits sidérurgiques de masse et de faible qualité. C'est en 2005 que Mittal Steel devient premier producteur mondial avec 57 Mt devant Arcelor (42.8 Mt). Un an plus tard et deux OPA après, le groupe ArcelorMittal prend forme avec tous les remous médiatiques et politiques qui ont suivis dans les instances européennes et au sein des pays associés à l'entreprise Arcelor. Au-delà des quantités produites, souvent de plusieurs dizaines de millions de tonnes par an, l'acteur globalisé s'est

développé rapidement à travers des fusions et acquisitions. N'hésitant pas à s'endetter lourdement auprès de financeurs internationaux auquel il a accès grâce à sa présence internationale, il bénéficie d'économies d'échelle importantes et produit en grande majorité des commodités, tout en cherchant comme l'ensemble des sidérurgistes, à se développer sur les aciers de spécialité. Outre ArcelorMittal, des acteurs comme Tata Steel, US Steel, Evraz, POSCO ou encore Nippon Steel et Sumitomo Metal Corporation peuvent être considérés comme des acteurs globalisés.

I.B.2 Les spécialistes régionaux : des acteurs historiques et la montée en puissance des sidérurgistes chinois

Parallèlement aux acteurs globaux, il existe sur le marché mondial une multitude d'acteurs régionaux tels ThyssenKrupp (Allemagne) ou Riva (Italie) produisant en moyenne entre 10 et 40 Mt par an. Tout comme ArcelorMittal, ces entreprises peuvent fournir une large gamme de produits sidérurgiques mais produisent dans un rayon plus restreint. ThyssenKrupp réunit par exemple ses unités de production uniquement en Allemagne qui représente 69% de ses commandes. Les acteurs régionaux se positionnent sur plusieurs segments de marché et leur stratégie repose en général sur un avantage technologique ou une compétitivité supérieure en termes de coûts. Grâce à une situation financière moins endettée ainsi qu'à une structure de gouvernance spécifique, l'effet de la crise fut moins important pour les acteurs régionaux européens que pour les grands groupes mondiaux. En effet, ce faible endettement et la présence des pouvoirs publics et des salariés dans la gouvernance ont permis à certaines de ces entreprises européennes de ne pas trop subir les effets de la crise, et rebondir en 2010-2011 grâce au maintien de leur outil de production. En Europe, il n'en reste pas moins que la baisse de la demande en provenance du secteur automobile et de l'industrie en général, puis du secteur de la construction, n'a pas permis de retrouver un niveau de production sidérurgique d'avant crise. Des entreprises comme Nucor, spécialisé dans les pro-

duits plats *via* la filière électrique aux Etats-Unis, Gerdau, essentiellement basé au Brésil et possédant quelques sites en Amérique du Sud et aux Etats-Unis, peuvent également être considérés comme des acteurs régionaux. Opérant essentiellement à l'est de l'Europe Metinvest (Ukraine) entre dans cette catégorie, tout comme son voisin russe Severstal, qui, en plus d'exercer la majeure partie de son activité sur le territoire russe, exploite des mines de fer et de charbon à coke pour ses sites. Même avec des niveaux de production supérieurs à 30 Mt, les sidérurgistes chinois sont aussi considérés comme acteurs régionaux, de par leur positionnement quasi exclusif sur le marché domestique. Cette position est néanmoins à nuancer en raison de leur influence sur le marché mondial, tant au niveau des prix de l'acier que sur les capacités de production gigantesques dont ils disposent, et donc la potentielle concurrence qu'ils représentent sur les autres marchés régionaux. La fragmentation du marché qui régnait jusqu'à la fin des années 80-90 en Chine a progressivement laissé place à de grands groupes sidérurgiques suffisamment intégrés pour produire de l'acier à moindre coût et alimenter l'économie chinoise. En termes de gouvernance, comme le montre le Tableau I.3, sur les vingt premières entreprises sidérurgiques chinoises, seules quatre sont contrôlées par des capitaux privés (Ministère de l'économie - DG Trésor, 2016).

Cette mainmise du pouvoir central permet d'orienter la politique sidérurgique, et même industrielle, selon des objectifs dont il est le garant à travers son plan quinquennal – en 2016, le 13^{ème} plan a été dévoilé. Ainsi, depuis plusieurs années la tendance est clairement à la fermeture des plus petites et anciennes usines sidérurgiques pour améliorer l'efficacité de son industrie et diminuer les surcapacités. A l'inverse, pour se développer, les grands groupes ont donc accès à des prêts favorables ainsi qu'à des tarifs préférentiels pour l'approvisionnement énergétique. Cette stratégie se heurte toutefois à la résistance des pouvoirs locaux, peu enclins à fermer leurs sites sidérurgiques moins volumineux mais fortement pourvoyeurs d'emplois.

TABLE I.3 – Production d'acier et statut des sidérurgistes chinois en 2014

Rang	Nom	Production (Mt)	Statut
1	Hebei Iron and Steel	47.1	Public
2	Baosteel	43.3	Public
3	Shagang	35.3	Privé
4	Ansteel	34.3	Public
5	Wuhan Iron and Steel	33.1	Public
6	Shougang	30.8	Public
7	Shandong Iron and Steel	23.3	Public
8	Maanshan Steel	18.9	Public
9	Tianjin Bohai	18.5	Public
10	Benxi Iron and Steel	16.3	Public
11	Valin	15.4	Public
12	Jianlong	15.3	Privé
13	Fangda Steel	13.6	Privé
14	Rizhao Steel	11.4	Public
15	Anyang Steel	10.9	Public
16	Taigang (TISCO)	10.7	Public
17	Baotou Steel	10.7	Public
18	Hebei Jingye	10.5	Public
19	Jiuquan Iron and Steel	10.3	Public
20	Zongheng Steel	10.3	Privé

I.B.3 Les spécialistes de niche

Le marché sidérurgique mondial est également caractérisé par un certain nombre d'acteurs ayant fait le choix d'une stratégie de spécialisation. Leur croissance est uniquement interne et basée sur une technologie de pointe pour délivrer des produits spécifiques. Parmi ces acteurs on retrouve par exemple la firme autrichienne Voestalpine, qui produit généralement moins de 5 Mt par an de produits plats à forte valeur ajoutée. Une telle spécialisation repose sur un outil de production abouti en aval, de courtes séries de production et est marquée par une relation étroite avec ses clients. Cette stratégie s'est avérée bénéfique durant la crise où leur rentabilité a certes baissé, mais dans des proportions beaucoup moins fortes que pour les autres entreprises européennes (LaPlace Conseil, 2013). A l'échelle

mondiale, ces entreprises évoluent donc sur le marché très fermé mais très convoité des aciers de spécialité. Représentant moins de 1% du volume total d'acier produit, ces aciers ne permettent pas aux sidérurgistes de niche de développer une production sur le plan quantitatif et de bénéficier d'économies d'échelle. Certains se positionnent comme des sous-traitants en allant jusqu'à la conception de sous-ensembles directement intégrables par les entreprises du secteur automobile, aéronautique ou énergétique par exemple. Au niveau mondial, l'essor de ces secteurs dans les pays émergents, notamment en Inde et en Chine, devrait augmenter les débouchés potentiels des sidérurgistes positionnés sur les aciers de spécialité. En revanche, cette perspective devrait également renforcer la concurrence avec de nouveaux acteurs cherchant à capter davantage de valeur ajoutée sur ces types de produits sidérurgiques.

Chapitre II

**The effect of recycling on a mining
oligopoly : competition for market shares
and collusion for market power**

Abstract

As an alternative to the production of virgin materials, recycling brings competition in a market dominated by an oligopoly of mining firms. Herein we investigate how recyclers affect the supply of materials in terms of market share and market power. Through an original Cournot-Stackelberg model, we show the positive effect between the number of mining firms and their aggregated market share. We highlight the importance of considering the levels of the recycling technology and the availability of scrap since they vary a lot among countries and materials. A significant switch in market shares and market power only arises when they are both at a high level. In addition, a technology threshold is required to allow recyclers to enter the market and compete with the mining firms. Assuming better recycling efficiency and availability of scrap in the long term, firms might undertake vertical or horizontal integration to keep providing input to the downstream industry.

Keywords : recycling technology, mining extraction, raw materials, Cournot, Stackelberg

1 Introduction

Besides discussing the existence of an oligopolistic mining supply in the iron and steel industry, in the previous chapter we have shed light on the concentration of demand over the last few years. While iron ore is required to produce steel in the Basic Oxygen Furnace (BOF) process, recycled material made with steel scrap is necessary to feed the Electrical Arc Furnace (EAF). Recycling is defined as « any operation where waste is reprocessed into a substance, material or product for the purpose of its original function or for other purposes (..) »¹. This definition illustrates the switch in which waste becomes a product or a secondary raw material after a valuable operation. Hence, a « recycler » is used for any entity that gives a value to the waste through recovering, crushing or reprocessing in order to resell it to manufacturers. Behind these semantic aspects, a debate for the status of waste arose among researchers in law and economics. By becoming a « product », waste creates new economic perspectives in terms of international trade. Meanwhile, regulations are needed in order to control more specific wastes, like hazardous ones. For instance, the Basle Convention, which came into force in May 1992, was designed to reduce the transboundary movements of hazardous waste. More specifically, this Convention aims at preventing transfers from developed to less developed countries.

Such a regulation reflects the existence of a typology. A classification of wastes can be done according to their nature (*e.g.* hazardous or non-hazardous, inert or non-inert) or to their origin (*e.g.* household, assimilated, from economic activities), but for the sake of simplification, we use the following broader definition from Henry-Wittmann (1996) : « unwanted residue of a process of production, transformation or use, material substance, product, and more generally any movable good for which there is no economic value, and whose owner or holder desires or has an obligation to discard it ». Through this definition, Henry-Wittmann (1996) highlights the non-economic use of waste. Hence, unlike energy recovering

¹Code de l'environnement, article L. 541-1-1

or landfilling, recycling is a way of treating waste that increases the life of a raw material. By giving it a new economic value, its productivity rises and then, a secondary material is born. In this chapter, we only deal with the flow of « old waste » since it represents the greatest recycling potential and it appears to be of greater interest in terms of economic analysis ².

In light of the switch from a linear to a circular economy, recycling plays a fundamental role in three main aspects³. First, energy transition and the digital economy increase the demand for materials and strengthen the need to address the scarcity issue. Second, environmental impacts occurring in mining activity are extensive in terms of the emission of pollutants, biodiversity losses and land use. These effects are even worse when including externalities in the downstream industrial process and end-use waste management. Last but not least, countries with fewer resources can be highly dependent on other countries sufficiently endowed with virgin materials ; hence, implementing a recycling sector at home can be positive in terms of trade balance and local employment. Dussaux and Glachant (2018) showed that a 10 per cent increase in recycling leads to a 2 per cent decrease in virgin material imports. However, since recycling produces a substitute for virgin material, prior extraction is potentially a source of later competition between mining firms and recyclers. The former have the advantage of determining both what remains to be extracted and what could be recycled in the next period.

In this theoretical chapter, we investigate the effect of recycling on the supply of materials in terms of market share and market power. As far as we know, the

²Pearce and Turner (1991) distinguish « home waste » which comes from the production cycle and is reused as part of the same production process. Its recycling rate is almost 100 per cent and it allows the firm to avoid purchasing additional materials. In the industrial production cycle, « new waste » also presents a very high level of recycling. It is subject to a return from a manufacturer to their supplier as long as there are no logistical difficulties and the material is not yet mixed with other substances (*e.g.* steel that does not yet contain copper or zinc). These two types of waste are distinguished from « old waste » that has already been consumed (*i.e.* end-of-life product) and for which reintroduction into the production process is more difficult regarding the issues of collection and mix of substances.

³For further details, see the communication COM/2015/0614 from the European Commission called « Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy ».

industrial sector is still essentially provided with virgin materials rather than with recycled ones. It stands to reason that this is true for the supply of strategic materials such as the rare earth elements (REEs), but it might not be true for some base metals such as iron ore. In specific countries where recycling is sufficiently developed, the supply can be dominated by recyclers. For instance, the United States and Italy produce, respectively, 61 per cent and 70 per cent of their steel with recycled material as the main input (World Steel Association, 2016). However, as far as we know, this situation is rather rare, while the switch from a supply of virgin to a supply of recycled materials should be considered of great interest.

Our approach is based on an original Cournot-Stackelberg model because this specific competition involves an oligopoly of non-cooperative firms and a fringe of competitive recyclers. The main assumption we drop from the previous literature is the existence of a monopolistic mining sector, since, to better reflect current market conditions, we focus on a non-cooperative oligopoly. As a main result, we show the positive effect between the number of mining firms and the extraction sector's market share. In addition we shed light on the fact that a technology threshold is required to allow recyclers to enter the competition. Our findings also show that both the recycling technology and the stock of scrap have to be high to generate a significant switch in the supply of materials in favor of recyclers, and a decrease of the mining market power. More widely, our contribution highlights the role of variable that might affect the magnitude of competition such as the number of mining firms, the cost of mining, the technology of recycling and the availability of scrap. Hence, the intensity of competition differs among materials and countries. Since we do not deal with the effect of recycling on resource depletion or on the optimal price path, our work would best be seen as a contribution to Industrial Organisation (IO) rather than to natural resource economics. We implicitly assume that the higher the market share for recyclers, the slower the depletion of materials.

The chapter is organised as follows. Section 2 browses the literature dealing

with a non-competitive market structure within a resource extraction sector. Section 3 focuses on the literature about the presence of a recycled substitute to the mining output. Section 4 presents our Cournot-Stackelberg model, while Section 5 gives numerical applications. Section 6 discusses mining strategies and Section 7 presents the conclusion.

2 A non-competitive market structure of mining : overview of the costs and market-power

Subsection 2.1. provides empirical elements about the cost of mining and subsection 2.2. deals with the literature about the related market power of the mining sector.

2.1 A high fixed cost, a low variable cost

No matter the process, extracting raw materials presents a high fixed cost : the mining asset. Basically, this capital value reflects the discounted cash flows of the ore extracted from the deposit and relies on a negotiation with the public authority or any other stakeholder who owns the deposit or a part of it. Among many risks associated with mining, political instability in the country where the resource is located is one of them. Hence, uncertainties about the exploitation of a deposit arise and might generate higher costs ⁴. In addition to buying the asset, mining firms also have to massively invest in transport infrastructure to bring the extracted ore to the export area or any other facility. For instance, an estimation for an iron ore mining project in Africa stated that three-quarters of the total investment of 20 billion US\$ was required for transport and logistics⁵. As explained in the previous chapter, such a high fixed cost represents a significant barrier to entry, especially in an economic downturn context.

⁴For further details see Baurens (2010)

⁵Source in French : <https://www.jeuneafrique.com/326467/economie/guinee-letude-de-faisabilite-projet-minier-de-simandou-sud-enfin-remise-gouvernement/>

Unsurprisingly, the composition of variable cost (*i.e.* the mining operation cost) varies among materials and countries. Labour can represent 50 per cent of the total cost in a typical gold mine ⁶ and be estimated to 26 per cent in other projects ⁷. In addition, the composition of this operating cost strongly depends on the type of process involved : open-pit when the deposit is within a hundred metres of the surface, or underground for those at greater depth ; the deeper the deposit, the higher the cost to extract the ore. Kesler and Simon (2015) stated that 90 per cent

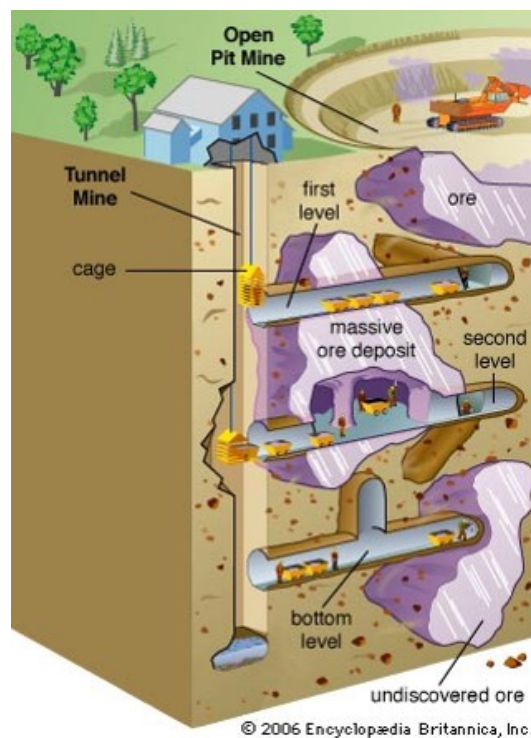


FIGURE II.1 – Open-pit *vs* underground mining

of deposits in the United States are open-pit, while this share is only 50 per cent in the world as a whole. The explanation does not only come from potential regulation constraints or geological criteria, but there is also an economic reason. Given that the undermining process requires more labour than capital per unit of output,

⁶Source : CPM Group (2012) ;

<http://www.goldconvention.in/iigc2012/presentation/CPM%20Group%20Overview%20of%20Mining%20Costs%20RS.pdf>

⁷Source : Minerals Council South-Africa (2016) ;

<http://www.mineralscouncil.org.za/reports/2016/download/CM-IR16-economics-mining.pdf>

extracting resources tend to be employed in open-pit operations where wages are high (*i.e.* in developed countries), while undermining is chosen in countries with low wages (*i.e.* in emerging and less developed countries). Regarding the global trend in the mining sector, it seems that extracting materials will become more expensive in future. In South Africa, labour costs rose on average by 10 per cent over the last six years while intermediary costs such as electricity, petroleum and machinery increased annually on average by 12.3 per cent in the last ten years (Minerals Council South-Africa, 2016). In Chile, the average variable cost in the mining sector increased by 201 per cent between 2000 and 2016 ⁸.

2.2 Market power for non-competitive mining firms

Since the mining sector is a non-competitive market structure most of the time (Wan and Boyce (2014); Salo and Tahvonen (2001)), it allows firms to potentially use market power which is defined as the aptitude to set up a price higher than its competitive level. Encaoua and Jacquemin (1978) show the positive relationship between market concentration and the magnitude of the market power. They also confirm that the higher the price elasticity of demand the lower the market power, AS Lerner (1934) demonstrated decades before, through the so-called « Lerner index ». For a monopoly it gives :

$$L = \frac{p - MC}{p} = \frac{1}{\eta} \quad (\text{II.1})$$

The left-hand part that is determined by the Marginal Cost (MC) and the price, is the mark-up. η determines the price elasticity of demand. Between a full monopolistic market power depending on η and a price-taker position in a perfect competitive market structure, there exists a lot of situations where few firms interact with each other and make analysis in Industrial Organisation (IO) much more complex. Iwata (1974), Perry (1989) and many others use « conjectural va-

⁸Source : Chilean Copper Commission (2017);
<https://www.cochilco.cl/Presentaciones%20Ingls/Chilean%20Copper%20Mining%20Costs.pdf>

riations $\gg$ in their model. This reflects the way a firm anticipates the reaction of its rival(s) when determining its price/output strategy by one unit in a simultaneous game. The standard *à la Cournot* model considers conjectural variations as nil such as $\frac{\partial q_i^i}{\partial q_j^j} = 0$ where i and j are two firms from a duopoly. We argue that this assumption can fit the mining industry. The time delay to increase/decrease production regarding a competitor's strategy can be too long because the production constraint related to the size of the deposit might appear binding for some mining firms. Hence, the output/price decision sequencing is non-frequent since it relies on acquisition or discoveries of new deposits. Each one of the mining firms takes the other quantity as given. We expect that mining strategies are mostly driven in the medium/long term where access to the easiest and cheapest material deposit is at stake. Measuring the market power of an industry is subject to much empirical work and might support public policy' decisions in antitrust regulation, as we have illustrated in Chapter 1.

In addition, decades after Hotelling's work (1931) about the resource-conservative behaviour of a monopolist, many economists became interested in studying the effect of mining market structures on price and resource scarcity. Stiglitz (1976) extended the framework by highlighting the role of the price elasticity of demand and the cost of extraction. His results confirmed the lower optimal rate of extraction for a monopolist except when both of these assumptions are considered : a constant elasticity of demand and extraction costs equal to zero. Following the 1973 oil crisis and the presence of OPEC as a dominant player, a number of studies concentrated on oligopolistic market structures. Among the earlier studies, that of Lewis and Schmalensee (1980) showed that by assuming fixed reserves and the same costs for the mining firms, a faster rate of extraction is expected with an increasing number of suppliers. Globally, the stream of literature related to oligopoly is divided according to whether players act within a Cournot or a Stackleberg game, more specifically, whether the cartel takes into account the decision of the fringe following its own production decision. An abundant volume of literature ex-

tended this framework by focusing on strategic considerations, especially in game theory analyses ⁹

3 The effect of a secondary substitute on the market power : the Alcoa case

Unlike materials, substitutes for non-renewable energy resources seem to attract more attention from public authorities regarding the climate change context and all opportunities related to the use of renewable energy resources. Finding a substitute for a material is not an easy task since they all have their own physical and chemical properties. In the literature, Stiglitz and Dasgupta (1982) included in their model a new commodity as a substitute for the natural resource. Under certain assumptions, they showed that the new technology takes over only when the natural resource is no longer available, since deposits with lower extraction costs will be exploited first. In addition, Hoel (1978) found that « the resource is extracted at a faster rate before exhaustion occurs in the case of a substitute than in the case without a substitute ». In parallel, another body of literature considered that the substitute comes from waste since a secondary material can arise from a recycling process.

The issue of how recycling might interfere with a non-competitive mining market structure started decades ago through the famous Alcoa antitrust case ¹⁰. In 1937, Alcoa was sued by the US Department of Justice for monopolistic behaviour in the aluminium market, in violation of the Sherman Antitrust Act ¹¹. However, three years later, a district court exonerated the firm by arguing the existence of a competitive secondary sector limiting Alcoa's market power. After new releases about Alcoa's monopolistic behavior and regarding its 90 per cent of market shares,

⁹In addition to provide a comprehensive literature review about the natural resource economics theory and the Hotelling rule, Gaudet (2007) gives insight about the related issues when dealing with strategic considerations in oligopolistic nonrenewable markets.

¹⁰United States *vs* Alcoa, 148 F.2d 416 (2d Cir. 1945)

¹¹In a nutshell, this refers to the first legislation enacted by the US Congress in 1890 to curb concentrations of power that interfere with trade and reduce economic competition.

the US Supreme Court took over the case. Arguing that the secondary sector belonged to the relevant market and that by controlling the primary market, Alcoa also controlled the secondary supply, the firm was found guilty of holding a monopolistic position and sentenced to separate from its Canadian subsidiaries. In addition, in 1945, the Federal Government granted some of its aluminium factories to Alcoa's competitors, Reynolds and Kaiser. In 1958, Alcoa's market share decreased to 35 per cent, turning the aluminium supply into an oligopoly.

Based on this case, Gaskins (1974) was the first to study whether the competitive supply of recycled aluminium inexorably drives the price of the resource toward its competitive level (*i.e.* the pro-competitive effect of the recycling sector on the mining sector). His results showed that the existence of the second-hand market makes things worse in the short term. To limit future competition with recyclers, a mining firm might strategically decrease its output, which implies an increase in the price. In the long term, the dominance of a virgin material producer relies on the steady rate of demand growth. Since product demand was increasing over time, he concluded that Alcoa would have considerable market power in the long term ¹². In his model, Swan (1980) also predicted that the long-term price was close to the predicted monopoly price in the absence of recycling (*i.e.* Alcoa's market power was not substantially affected by recycling). However, he shaded Gaskin's conclusions regarding the sensitivity of his results to the rate of demand growth, and underlined the more important role of the monopolist's strategic behaviour. Swan (1980) also extended the model by specifying a recycling function in which he includes a parameter of technology, and by considering whether scrap was sold or discarded by purchasers of aluminium products. In addition to consider various forms of vertical integration by the monopolist, Martin (1982) also

¹²His empirical findings showed that the initial price practised by the monopoly with a recycling sector is 6 per cent higher than without the recycling and 3.5 times higher than the competitive price. In the long term, the price is estimated to be 14 per cent lower with the recycling sector but is still 2.8 times higher than the competitive level. The simulation also indicates that the secondary sector entails a progressive decrease in the price, but 100 years would be necessary to see the long-term equilibrium value reduced by 5 per cent.

dealt with the specific Alcoa case. His results confirmed Judge Hand's decision and what Gaskins (1974) and Swan (1980) found about the very little effect of recycling over the mining market power. He demonstrated that the price cannot reach its competitive level as long as leaks of material occur during the recycling process. Hence, he underlined in his conclusion the importance of the technology of scrap recovery or scrap conversion.

Unlike Gaskins (1974), Swan (1980), Martin (1982) and also Hollander and Lasserre (1988) who investigated the case of a monopolist integrating the recycling activity, we consider in this chapter that the mining sector is oligopolistic rather than monopolistic. It reflects new perspectives *vis-à-vis* the recycling sector, and it also implies potential strategies among the mining firms¹³. As far as we know, for most virgin resources, the rise in demand and in the international trade of commodities throughout the second half of the twentieth century, as well as antitrust regulations and privatisation of state owned mining firms, have helped the mining sector to gain attractiveness and have caused the move from a monopoly to a worldwide oligopoly. Nevertheless, the need to cover important fixed costs and the large scale of destination markets have caused the mining sector to be controlled by only a few companies and have prevented it from being perfectly competitive (Kesler and Simon, 2015). Regarding the production for few materials, it turns out that in 2011, only two firms held more than 60 per cent of the market shares of platinum (Wan and Boyce, 2014). There were five companies holding 42 per cent of the market shares for aluminium, while ten mining companies produced more than 50 per cent of the world production of copper. Hence, it is worth considering how much such a concentration of mining production affects competition with recyclers. Our model shows that a more competitive mining sector helps the firms to keep and even increase their market share, although it also implies an increase in secondary production.

¹³Hotelling (1931) already mentioned that this market feature is « more closely related to the real economic world than either monopoly or perfect competition ». More recently, Salo and Tahvonen (2001) also stated that « many natural resource industries cannot be described using a pure monopoly or competitive model ».

In addition, following Swan's model (1980) and in line with Martin's conclusions (1982), we specify a recycling function that includes a technology parameter. It helps in reducing leaks of material and it is one of the factors explaining the extent to which recyclers can compete with mining firms. However, unlike that of Swan (1980) our model highlights the effect of this technology in the competition as well as its effect on the market power of the mining firms. As a contribution, we also show the existence of a technology threshold that allows recyclers to enter the market.

In a more general model of the recycling problem, Grant (1999) confirmed that the long-term price of aluminium charged by Alcoa was not, substantially, affected by recycling. Unlike previous studies, he considered that the main source of Alcoa's market power was the relatively higher cost of recycling compared to mining and then, the inability of recyclers to be competitive enough. With data from 1923 to 1940, Grant (1999) also concluded that this relatively higher cost caused a decline in social welfare, since « secondary aluminium are recycled at costs exceeding those of producing virgin material, generating a welfare loss ». It turns out that this loss was not offset by the increase in consumer surplus.

Contrary to Grant (1999) and authors previously mentioned who considered a constant cost of mining, here in this chapter we assume a convex cost function. Indeed, while technical progress allowed the mining firms to continuously decrease the cost of extraction during the last decades, for middle and longer-term perspectives, firms might likely face rising costs due to the depletion of high-quality ore deposits (*e.g.* the average ore grade of Chilean copper mines has decreased by approximately 28.8 per cent in only ten years (Calvo *et al.*, 2015)) and environmental regulations (*e.g.* CO₂ emission taxes ¹⁴, water pollutant emission standards and land restoration policy). Hence, dealing with the issues of virgin material scarcity and environmental externalities makes us implicitly assume that the extraction

¹⁴South Africa is one of the most endowed countries in mineral resources and announced on the 26th of May 2019, the creation of a carbon tax to about 8 US\$ per ton of CO₂ ;

Source : <https://af.reuters.com/article/southAfricaNews/idAFL8N2320B8>

technology exhibits decreasing returns to scale. We show that this assumption is of benefit to recyclers since it makes them more competitive, although our model also highlights that without considering potential strategies from the mining firms, under certain conditions, recycling can lead to a greater market power for the non-cooperative oligopoly. Except for Gaudet and Van Long (2003) and Ba (2017) who found a similar result with a Cournot model between a mining monopolist and N recyclers that may or may not be competitive (*i.e.* depending on whether recyclability is high or low), a greater market power has only been found when the monopolist could strategically decrease its output in order to prevent future competition.

In a broader view, Andre and Cerda (2006) investigated the effect of recycling on the availability of resource and on the growth of the economy. They distinguished a scale effect from a technological effect. The former captures an « exogenous increment of the resource stock », while the latter corresponds to a change in the substitution between renewable and non-renewable inputs within a production process. However, Andre and Cerda (2006) only focused on the technological nature of recycling and disregarded the aspects related to market structures and the cost of recycling. Lately, Ba and Mahenc (2018) studied how the extractor can set up a strategy in the face of prospective recycling, as well as how it modifies the Hotelling rule in a two-period model. They considered the owner of a natural resource either as a standard company maximising its profit, or, for instance, as a public authority that aims to maximise social welfare. Depending on the fixed cost of recycling, the former case leads the mining monopolist to deter recyclers from entering the market, while the latter case leads the monopolist to accommodate or promote recycling. Hence, either it slows down the resource depletion or it speeds it up, modifying the Hotelling rule.

Here in this chapter, we do not address the scarcity issue or the effect of recycling on the Hotelling rule. In addition to changing several assumptions from the literature, we focus on the market shares of the supply of resources as well as

the mining market power. More specifically, we highlight the effects of the number of mining firms, the recycling technology and the availability of scrap.

4 The Cournot-Stackelberg model for a recycling-mining competition

Subsection 4.1. sets up the model and provides a first understanding of the competition through a two-period approach. Subsection 4.2 extends the time period and considers a steady state equilibrium.

4.1 A basic two-period approach

Settings

To illustrate the Cournot-Stackelberg model as simply as possible, we consider it in a non-renewable resource market, involving two symmetric mining firms i and j of equal size and with the same cost structure. They both own an equivalent share of the deposit, extract and sell, for instance, metallic ore to a competitive industry in $t = 1, 2$. For the sake of simplicity, the stock is sufficiently large and material is not exhausted over the two periods ¹⁵. In $t = 1$, the non-cooperative firms extract what is needed to meet demand in materials. q_1^i and q_1^j are the production of i and j respectively. We define Q^Y as the total mining output. It yields in period 1, $q_1^i + q_1^j = Q_1^Y$. Thereafter, the extracted material is spread out over various consumption sectors and integrated into buildings and infrastructures, means of transport, electronic devices, home appliances, etc. The share of each consumption sector varies among materials and countries ¹⁶. We define a parameter θ representing the proportion of material-based products, which, after being consumed, maybe repaired and/or re-used, reach their end-of-life and become waste. For instance, θ can reflect the share of short lifespan products while

¹⁵This assumption is further discussed in the model with infinite horizon (subsection 4.2).

¹⁶For instance, 31 per cent of steel is dedicated to the construction sector in Germany while it reaches approximately 60 per cent in China (Source : German Steel Federation, Deloitte (2018)).

$(1 - \theta)$ shows the proportion of materials held in products for too long to become waste. Hence, θQ_1 is the stock of waste in the second period and $Q_1(1 - \theta)$ represents the stock of materials maintained in use. Regarding the former, end-of-life options are landfilling, incineration and recycling. A share might also be discarded in nature.

By focusing on recycling, we assume that z_2 is the expenditures of collecting, sorting, and processing a unit of scrap, to deliver a recycled material to a competitive industry Swan (1980). Labour, energy and capital per unit of scrap are also included in z . Hence, in $t = 2$, recyclers might enter into competition with the mining firms i and j to provide materials. We assume in our whole analysis that both virgin and recycled materials are perfectly substitutable¹⁷. Recalling z_2 allows us to define $r(z_2)$, a recycling function that reflects the ability of recyclers to produce a secondary output with respect to the available stock of waste. We also define S_2 as the supply of recycled materials such that :

$$S_2 = \underbrace{r(z_2) \overbrace{\theta Q_1}^{\text{Stock of waste}}}_{\text{Waste collected and transformed into recycled material}} \quad (\text{II.2})$$

The following properties apply :

- $0 < r(z) < 1$ shows that recycling of waste cannot exceed the stock (*i.e.* $S_2 < \theta Q_1$);
- $r(0) = 0$ and $\lim_{z_2 \rightarrow +\infty} r(z_2) = 1$;

¹⁷Like in the previous related literature, we maintain such assumption for the sake of simplicity in our model, although according to the OECD, « secondary metals are deemed highly substitutable but are not perfect substitutes (...) » (McCarthy and Borkey (2018) ; OECD (2018)). This level of substitution strongly relies on the type of material, as well as on the final product requirements in terms of purity (*i.e.* absence of other material residue). Regarding the steelmaking industry, except for very high-added value products, it is technically equivalent to using scrap rather than iron ore as the main input (source : interview conducted with Marcel Genet, CEO of Laplace Conseil, on the 12th May 2015.). In addition, we consider that if the recycled material is not sufficiently competitive with the virgin one, the issue lies in the low level of recycling technology to make the material purer.

- $1 - r(z)$ reflects leaks of materials during the recycling process (*i.e.* the depreciation phenomenon), and a part of waste going to landfilling and incineration, rather than collected by recyclers.

Hence, in $t = 2$ the whole supply of materials is : $Q_2 = Q_2^Y + S_2$. Since $S_1 = 0$, we also have $Q_1 = Q_1^Y$.

Competition

We assume that mining firms have a temporal and informational advantage over recyclers since they know how recyclers will react according to the level of extraction. Hence, the market is dominated by a small number of mining firms considered as leaders, and completed by a fringe of recyclers considered as followers. This specific market structure leads us to consider a threefold process. First, the standard Stackelberg game is such that recyclers equalise their marginal cost with the given price, by considering mining production as given. Hence, as a second step in our model, i and j integrate the recyclers' behaviour (*i.e.* the reaction function) to determine their respective optimal output through a Cournot competition. It yields an optimal mining output used to determine in a third step, the optimal secondary output and then, the whole supply of materials in $t = 2$.

Let $\Pi_2^S = (p_2 r(z_2) - z_2)\theta Q_1$ be the profit function of recyclers in the second period. The FOC is :

$$\frac{\partial \Pi_2^S}{\partial z_2} = \Pi_2^{S'} = p_2 r'(z_2) - 1 = 0 \Leftrightarrow r'(z_2) = \frac{1}{p_2} \quad (\text{II.3})$$

As Swan (1980) and Martin (1982) showed, this result illustrates the concavity of the recycling function, with $r'(z_2) > 0$ and $r''(z_2) < 0$. The diminishing returns reflect the increasing difficulty in recycling despite higher expenses per tonne of scrap.

We use the functional form of $r(z)$ from Swan (1980), such that $r(z_2) = 1 - e^{-kz_2}$. The parameter $1 \leq k < +\infty$ is exogenous and captures a level of technology

in the recycling process. The higher k is, the more efficient recycling will be since it becomes easier to separate materials, and then, rely less on the quality of the composition of the waste. This functional form of $r(z)$ allows us to find the optimal solution verifying that $\Pi_2^{S'} = 0$. It yields the marginal cost of recycling $\hat{z} = \frac{\ln k + \ln p_2}{k}$, which illustrates that a high price encourages recyclers to spend more per unit of scrap. They aim at collecting and transforming the whole stock of waste θQ_1 into recycled materials such that $r(z_2) \rightarrow 1$, but might be discouraged if the price is low and/or if the technology is not efficient enough. Integrating $\hat{z}$ into the recycling function yields :

$$r(\hat{z}) = 1 - \frac{1}{kp_2} \quad (\text{II.4})$$

We assume a non-linear inverse demand defined as $p(Q_t) = \frac{A}{(Q_t)^\alpha}$ where A represents the scale of demand and α the price elasticity. With (II.2) and assuming, for the sake of simplicity, that $\alpha = 1$, we can express the recyclers' reaction function as follows :

$$S(Q_2^Y) = \theta Q_1 \left(\frac{Ak - Q_2^Y}{Ak + \theta Q_1} \right) \quad (\text{II.5})$$

To allow $S_2 \geq 0$, we consider $Q_2^Y \leq Ak$. With $\frac{\partial S_2}{\partial Q_2^Y} < 0$, we show that the secondary supply decreases with the total output of the mining firms in $t = 2$.

As a second step in our model, i and j maximise their profit in a standard Cournot competition and integrate the recyclers' reaction function $S(Q_2^Y)$ in both periods.

- In $t = 1$, i , for instance, considers that a part of its output will return into the market in the next period. Aggregating the mining firm's output gives the recyclers' capacity constraint for the next period. Formally, the optimal mining output for i in the first period is such that :

$$\max_{q_1^i} \Pi_1^i = p(q_1^i; q_1^j) q_1^i - c(q_1^i) + \delta [p(q_2^i; q_2^j; S_2(Q_2^Y; q_1^i)) q_2^i - c(q_2^i)] \quad (\text{II.6})$$

where δ is the discount factor. By breaking down the effect of q_1^i on the price

in the second period, the FOC yields :

$$p'_1 q_1^i + p(Q_1) + \delta \underbrace{\left(\overbrace{\frac{\partial Q_1}{\partial q_1^i}}^{(=1)} \times \overbrace{\frac{\partial S_2}{\partial Q_1}}^{(+)} \times \overbrace{\frac{\partial p_2}{\partial S_2}}^{(-)} \right)}_{<0} = c'(q_1^i) \quad (\text{II.7})$$

The mining firm anticipates the future competition, which results in a decrease in its marginal revenue in the first period, compared to a situation without recycling.

- In $t = 2$, recyclers produce a secondary output as followers and with the constraint of production defined in the previous period. As a standard Stackelberg competition, the firms i and j take $S(Q_2^Y)$ to define their output in period 2. Formally, we have :

$$\max_{q_2^i} \Pi_2^i = p(q_2^i, q_2^j; S(Q_2^Y)) q_2^i - c(q_2^i) \quad (\text{II.8})$$

Using (II.5), the FOC yields :

$$p'_2 q_2^i \times \underbrace{\frac{\partial Q_2^Y}{\partial q_2^i}}_{=1} \times \underbrace{\frac{\partial Q_2}{\partial Q_2^Y}}_{]0:1]} + p(Q_2) = c'(q_2^i) \quad (\text{II.9})$$

In this second period, the mining firm faces a residual demand. By breaking down the effect of q_2^i , we show how recycling negatively affects the mining firm's marginal revenue, since $\frac{\partial Q_2}{\partial q_2^i} \Big|_{\theta=0} = 1$ while $0 < \frac{\partial Q_2}{\partial q_2^i} \Big|_{\theta>0} < 1$ and $p(Q_2)|_{\theta=0} > p(Q_2)|_{\theta>0}$ (see Appendix II.A for further details).

Since we consider in this chapter that the mining sector is oligopolistic, we aim to observe the effect of n mining firms over the supply of materials. In a standard oligopoly, when the number of firms increases, it yields a greater aggregate output. The question is of interest when recyclers are also involved with the supply of materials. Recalling the context of competition in $t = 2$, it yields the following Proposition :

Proposition 1 : *Despite the existence of recycling, a more competitive mining sector increases the aggregate mining output. However, the situation for each mining firm is more ambiguous and depends in particular on the magnitude of the secondary sector.*

- Proof : Appendix II.A

The standard Cournot competition over the two periods gives implicit values for q^{i*} and q^{j*} . Aggregating the n mining firms yields Q^{Y*} that is used to obtain the optimal secondary supply as follows :

$$S^* = \theta Q^{Y*} \times \left(\frac{Ak - Q^{Y*}}{Ak + \theta Q^{Y*}} \right) \quad (\text{II.10})$$

From (II.10) we can see the ambiguous effect of the mining output highlighting the extraction firms' dilemma. Their output is the source of future competition when it feeds the stock of scrap (*i.e.* the Q^{Y*} associated with θ) and at the same time, it lowers the secondary supply as it is illustrated with the recyclers' reaction function. Consequently, the effect of a more competitive mining sector is also ambiguous. On the one hand, a greater n increases the mining output and therefore the stock of scrap (*i.e.* as in $t = 1$). On the other hand, the induced rise of Q^{Y*} lowers the price and thus, discourages recyclers to raise their expenses (*i.e.* as in $t = 2$) that would have improved their recycling rate.

The way the mining firms are affected and the optimal secondary supply seem to strongly depend on the ability of recycling to close the loop of materials thanks to an efficient technology and a high level of availability of scrap.

However, although this two-period scenario stated here allows for a good first understanding of the competition, it cannot stand in reality since the stock of scrap, initially fed by the mining firms, also grows with the output of recyclers, as long as a third period is considered. In other words, the secondary sector also produces its future input.

4.2 The steady state model

To address the issue related to a two-period scenario, we extend the model with an infinite horizon and thus, analyse the competition within a steady state framework. We recall (II.4) to denote our optimal recycling function in t as :

$$r(\hat{z}_t) = 1 - \frac{1}{kp(Q_t)} \quad (\text{II.11})$$

Allowing recyclers to enter the market (*i.e.* $r(\hat{z}_t) > 0$) requires a certain level of technology that extracts the material from waste products. The more efficient is this technology, the better it can offset a potential low price and thus, offset a low incentive for recyclers to increase their expenses.

In addition, it turns out that a technology threshold must be reached. Its value can be found with the optimal mining output that relies on the parameters n , c and θ . It yields :

$$\tilde{k} = \frac{1+n}{1+n(\theta+c(1-\theta))} \quad (\text{II.12})$$

Proposition 2 : *There is a minimum level of recycling efficiency (*i.e.* a technology threshold) that allows recyclers to enter the market and compete with mining firms. This threshold decreases with the marginal cost of mining activity and with scrap availability, but increases with the number of mining firms.*

- Proof : Appendix II.B

While $k < \tilde{k}$ indicates there is no recycling at all, $k > \tilde{k}$ does not necessarily mean that recyclers can compete with the mining firms since a minimum level of available scrap must also be attained. This latter situation refers, for instance, to materials used in electronic devices, such as lithium, silicon or most of the REEs, for which we observe a very marginal level of recycled material compared to the mining output.

We assume now that a sufficient level of recycling efficiency is attained. Hence, given the optimal recycling function, we define S_t as follows ¹⁸ :

$$S_t = \theta Q_{t-1} \left(1 - \frac{1}{kp(Q_t)} \right) \quad (\text{II.13})$$

Let the intertemporal profit function of the firm i be :

$$\Pi^i = [p(Q_t)q_t^i - c(q_t^i)] + \sum_{\tau=1}^{\infty} \delta^\tau [p(Q_{t+\tau})q_{t+\tau}^i - c(q_{t+\tau}^i)] \quad (\text{II.14})$$

By considering $Q_t = Q_t^Y + S_t$ and since we denote the mining output as $Q_t^Y = \sum_{i=1}^n q_t^i$, we have the following FOC :

$$p'_t(Q_t)Q_t^Y \left(1 + \overbrace{\frac{\partial S_t}{\partial Q_t}}^{\text{Price effect}} \right) + np_t(Q_t) - c'(Q_t^Y) + \sum_{\tau=1}^{\infty} \delta^\tau p'_{t+\tau}(Q_{t+\tau})Q_{t+\tau}^Y \overbrace{\frac{\partial Q_{t+\tau}}{\partial Q_t}}^{\text{Stock effect}} c'(Q_{t+\tau}^Y) = 0$$

Here we observe the two effects related to the presence of recyclers, as mentioned in the two-period case. With $\frac{\partial S_t}{\partial Q_t}$ expected to be negative, we highlight the link between mining output and the recycling supply in period t through the immediate price effect. In addition, the component $\frac{\partial Q_{t+\tau}}{\partial Q_t}$ expected to be positive, captures the fact that recycling creates a loop and increases the resource productivity over time, such that a rise in production in t , is back on the market in the future $t + \tau$. As already shown in a monopoly case, recycling leads to lower virgin output. Our interest here is to assess the magnitude of this decrease. We consider that this magnitude relies on the efficiency of recycling, the cost of mining and the number of mining firms ($\ll$ internal factors $\gg$), as well as on the availability of scrap, the price elasticity and the demand growth ($\ll$ external factors $\gg$).

With the secondary materials supply $S_t = r(\hat{z}_t)\theta Q_{t-1}$, the whole materials

¹⁸The one time period corresponds theoretically to one life cycle of the product so that, by definition, virgin sales equal total sales minus the secondary supply generated by the previous period's production. Hence, we consider here only the flow of short lifetime products.

supply is $Q_t = q_t^i + Q_t^Y - i + r(\hat{z}_t)\theta Q_{t-1}$. The FOC becomes ¹⁹ :

$$p'_t(Q_t)Q_t^Y \left(1 + \theta Q_{t-1} \frac{\partial r(\hat{z}_t)}{\partial Q_t}\right) + np(Q_t) - c'(Q_t^Y) + \sum_{\tau=1}^{\infty} \delta^\tau p'_{t+\tau}(Q_{t+\tau})Q_{t+\tau}^Y \frac{\partial Q_{t+\tau}}{\partial Q_t} = 0 \quad (\text{II.15})$$

We define the inverse demand function as $p(Q_t) = \frac{Ag^t}{Q_t^\alpha}$ where A , g^t and α capture the demand scale, the rate of growth and the price elasticity of demand, respectively. For any t and using (II.11) we have :

$$p'_t(Q_t)Q_t^Y = -\alpha p(Q_t) \left(1 - \frac{\theta}{g} + \frac{\theta}{k g p(Q_t)}\right) \quad (\text{II.16})$$

where g is defined as $g = \frac{g^t}{g^{t-1}}$.

In addition, since we have $\frac{\partial r(z_t)}{\partial Q_t} = -\frac{\alpha}{k Q_t p(Q_t)}$, then :

$$1 + \theta Q_{t-1} \frac{\partial r(z_t)}{\partial Q_t} = 1 - \frac{\alpha \theta}{k g p(Q_t)} \quad (\text{II.17})$$

We define at steady state $\hat{z}_t = z^*$, $Q_t^Y = Q^{Y*}$, $Q_t = Q^*$ and $e_{t,\tau} = \frac{\partial Q_{t+\tau}}{\partial Q_t} = e_\tau$. The latter is defined as :

$$e_\tau = g^\tau \left[\frac{\theta(k p(Q^*) - 1)}{k p(Q^*) g + \alpha \theta} \right]^\tau \quad (\text{II.18})$$

From (II.18), we can see that except in a closed-loop system (*i.e.* both θ and $r(z)$ equal to 1), in which the effect of a marginal increase in the total output will become constant and equal to 1, the higher that τ is (*i.e.* a given period), the lower that e_τ will be. This outcome captures the marginal resource productivity (*i.e.* the marginal productivity of recycling) over time since the output in a period t becomes the input for recyclers allowing them to produce for more than one period (*i.e.* $Q_{t+\tau}$). With accumulated depreciation, this marginal rise in production decreases over time until it reaches 0. The better that recycling is, the closer to 1 that resource productivity will be before reaching 0.

¹⁹For further details, see Appendix II.C

We also assume a convex cost function such that $c(q_t^i) = c \frac{(q_t^i)^2}{2}$ illustrating the rising expenses of mining firms. Indeed, we do not explicitly consider a finite stock of resource as it exists geologically speaking, but we rather use a convex cost of extraction. This captures the following three aspects :

- the depletion of the stock of ore which implies that mining firms drill increasingly deeper ;
- the depletion of high-quality ore deposits (*e.g.* the average ore grade of Chilean copper mines has decreased by approximately 28.8 per cent in only ten years (Calvo *et al.*, 2015)) ;
- the environmental regulations that might arise to address the externalities of mining activity (*e.g.* CO₂ emission taxes, water pollutant emissions standards, land restoration policy).

Indeed, while technical progress allowed mining firms to continuously decrease the cost of extraction during the last decades, for middle and longer-term perspectives, firms might likely face rising costs to extract an additional tonne of ore. Hence, in the model, we implicitly assume that the extraction technology exhibits decreasing returns to scale. Hence, we have :

$$c'(Q_t^Y) = cQ^* \left(1 - \frac{\theta}{g} + \frac{\theta}{k g p(Q^*)} \right) \quad (\text{II.19})$$

Combining (II.16), (II.17), (II.18) and (II.19) within the FOC implies :

$$\begin{aligned} & -\alpha p(Q^*) \left(1 - \frac{\theta}{g} + \frac{\theta}{k g p(Q^*)} \right) \left[\left(1 - \frac{\alpha \theta}{k g p(Q^*)} \right) + \left(\sum_{\tau=1}^{\infty} \delta^{\tau} g^{\tau} \left[\frac{\theta(k p(Q^*) - 1)}{k p(Q^*) g + \alpha \theta} \right]^{\tau} \right) \right] \\ & = cQ^* \left(1 - \frac{\theta}{g} + \frac{\theta}{k g p(Q^*)} \right) - n p(Q^*) \end{aligned} \quad (\text{II.20})$$

Using (II.20) and since $Q^{Y*}(Q^*) = Q^* \left(1 - \frac{\theta}{g} + \frac{\theta}{k g p(Q^*)} \right)$ we are able to find the optimal mining output Q^{Y*} and thus, the optimal secondary supply S^* . Given a set of values of the parameters, we can proceed to numerical simulations such as

the effect of a more competitive mining sector and the magnitude of the market power, embodied by the mark-up.

5 Numerical applications

Subsection 5.1 highlights the effect of a more competitive mining sector and subsection 5.2 the role of the growth of demand. We focus on the effect of the both parameters θ and k that define the magnitude of the secondary sector, on competition in subsection 5.3 and on the market power in subsection 5.4.

5.1 A more competitive mining sector

Our assumptions in dealing with an oligopoly lead us to see what the effect on the market of a larger number of mining firms. More specifically, we observe how the secondary supply is affected and thus, the effect of a greater n on the market shares. For convenience, we assume in the following simulations $\delta = 0.95$, a constant demand growth rate with $g = 1$, a marginal cost $c = 0.2$, a demand scale $A = 1$, and that price elasticity is equal to 0.25 (Fischer, 2001) ²⁰.

While on the left-hand side of Figure II.2, the positive relationship between Q^{Y*} and n confirm our Proposition 1, we observe that except for a high level of secondary supply (*i.e.* both θ and k are at high levels), the optimal mining output follows the same path with a more competitive market structure. On the right-hand side, the blue solid and dashed lines show how important the recycling technology is. No matter what the level of competition is, the market share of the oligopoly does not vary very much since the decreasing price coming from a more competitive sector is offset by a high level of k . The latter helps recyclers to rely less on market conditions such as price variations.

²⁰The simulations conducted with different levels of mining cost, elasticity and demand scale do not change the trend of the results presented in this subsection.

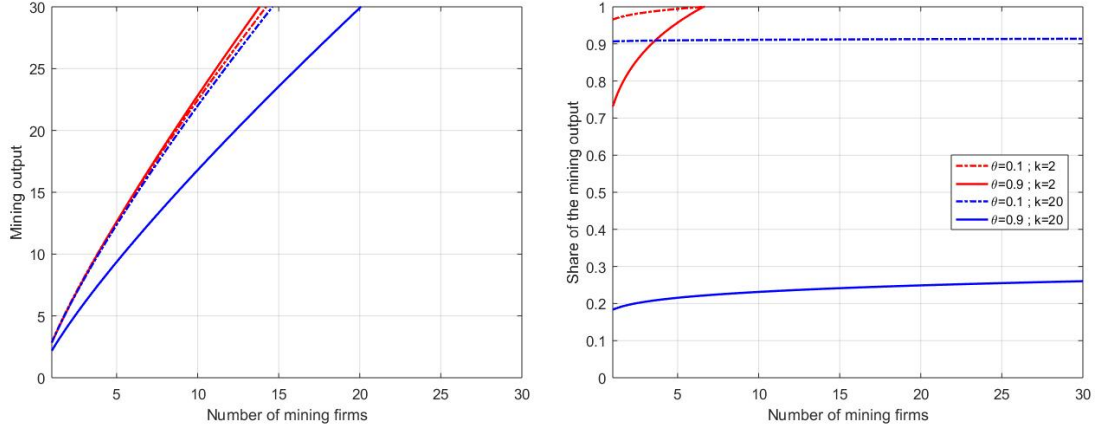


FIGURE II.2 – Mining output (left) and market share (right) of the oligopoly with respect to n

In addition, since there exists a threshold $\tilde{k}$ for recyclers to enter the market, we argue that a more competitive mining industry might push recyclers out of the market. We assume the existence of an optimal n^* where $Q^{Y*} = Q^*$. Considering a very low level of recycling (*i.e.* $k = 2$), the optimal number of mining firms here is $n^* = 6$.

We now narrow the effect of a more competitive mining sector on the secondary supply, allowing us to assume that a greater number of firms implies a « price effect » and a « stock effect ». The former discourages recyclers from increasing their expenses for better recycling rates. The latter is related to the rising available stock of scrap, which would help recyclers to increase their supply with a constant recycling rate. As already noted, a high level of k offsets the decreasing price induced by a more competitive mining sector. Hence, the stock effect is greater than the price effect so that the secondary supply increases, as shown on Figure II.3. It is also worth noting the hump shape of the solid and dashed red curves, indicating that, for a certain level of competition, the price effect becomes too strong. Despite a greater stock of scrap, the share available for recyclers is too low and the price does not offer sufficient incentive to invest in collecting and processing the higher deposit.

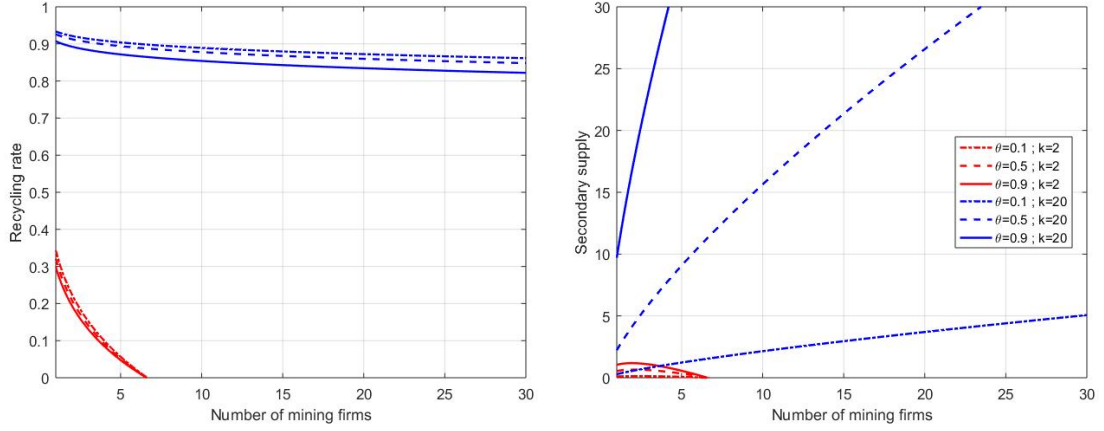


FIGURE II.3 – Evolution of the recycling rate (left) and the secondary supply (right) with respect to n

Proposition 3 : *A greater number of mining firms helps the virgin sector to keep and even increase its dominant position against recyclers. Similarly, this outcome implies a greater secondary supply since, except for a very low level of recycling, the stock effect exceeds the price effect.*

Remark 1 : In addition, the increase in n prevents the entrance of new recyclers since it pushes the threshold $\tilde{k}$ up (see Proposition 2).

Remark 2 : However, if this increase in the number of firms seems to benefit the virgin producers by limiting the influence of recyclers, it might also have an effect on the market power through the decrease in the price.

In addition to the number of mining firms, the magnitude of the effect of recycling on the oligopoly also relies on the recycling technology and the proportion of scrap availability, embodied by k and θ respectively.

5.2 Recycling technology, availability of scrap and the effect on competition

Using our model set-up at steady state in the previous section, we apply different values of θ and both virgin and secondary outputs are observed with respect to the

recycling technology (right-hand side of Figure II.4). This allows us to see under which conditions, recyclers can be dominant in the supply of materials.

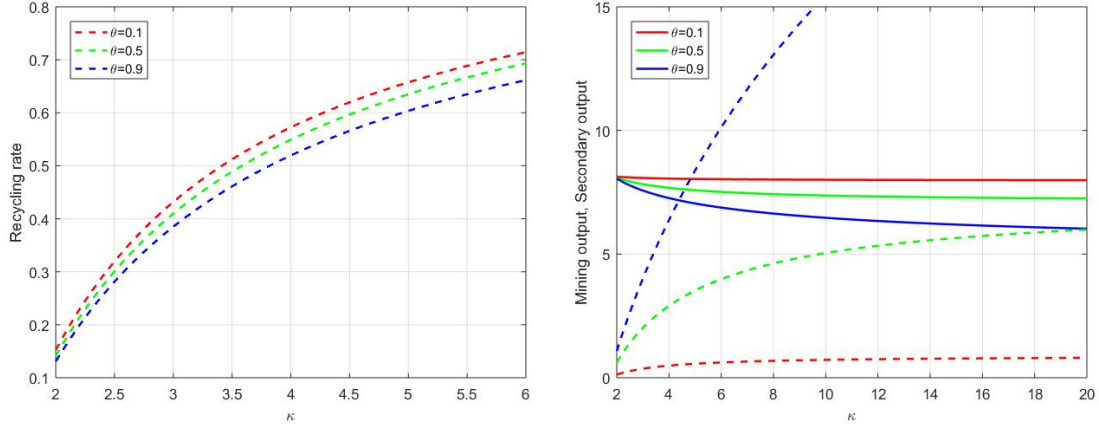


FIGURE II.4 – Recycling rate (left) and outputs with respect to the level of technology

While a k value ranging from three to four gives a recycling rate that goes from 40 per cent to 55 per cent (left-hand side of Figure II.4), we observe significant variations of the market shares according to the value of θ . For instance, with $\theta = 0.1$, the supply of both recyclers (shaded lines) and mining firms (solid lines) are steady, giving constant market shares despite an increasing technology of recycling (right-hand side of Figure II.4). Thus, increasing the recycling rate through a better technology seems to have an effect only if at least 50 per cent of material-based products have a short lifespan. More specifically, when the stock of materials maintained in use is too high, for instance when θ ranges from 0.1 to 0.5, even a recycling rate over 90 per cent (*i.e.* $k = 20$) would not allow recyclers to dominate the supply of materials. This outcome corresponds to the case in which the green dashed line is lower than the green solid line on the left-hand side of Figure II.4, and the blue dashed line is also lower than the blue solid line on the right-hand side of Figure II.4.

For instance, in emerging countries, regardless of the type of material, most of them are held into infrastructure and other durable goods. The metal use per capita remains low compared to industrialised countries so that the parameter θ is

low. In this context, the effect of stimulating the efficiency of recycling embodied by our parameter k would appear useless in the short term. An effect on the market will arise in the longer term when the stock of scrap becomes greater. This rise in the availability of scrap will increase along with the shift in the economy based on consumption instead of investment.

Remark 1 : In addition, since a greater θ implies a decrease of the technology threshold $\tilde{k}$ (*c.f.* Proposition 2), recyclers will benefit from economies of scale and thus, their dependence on an efficient technology required to enter the market will become lower.

Remark 2 : A distinction can also be made between strategic metals²¹ and base metals²². While a greater θ for both is expected, it does not mean their recycling rate will grow in the same way. Products into which materials are integrated make the collection of waste more or less complicated, and costly. As far as we know, strategic metals are incorporated more into various short lifespan products which are more widespread in the economy while base metals are used more in buildings and infrastructures. Hence, the rise in the recycling rate for strategic metals and thus, the share of the secondary sector in the supply of materials, might be lower than in the case base metals.

The reverse situation, in which we assume different values of k and where both virgin and secondary outputs are observed with respect to the recycling technology, confirms this outcome. Similarly, in Figure II.5, we also highlight how a rise in the availability of scrap would be inefficient if the recycling technology and then the recycling rate, is not high enough. This outcome corresponds to the small increase of the red dashed and solid lines, showing that under such conditions, market shares in the supply of materials remain barely constant.

²¹Materials that are important to a company/sector/country's strategic plan and supply chain management. The European Commission regularly updates a list of critical raw materials (CRMs). The main ones include cobalt, gallium, platinum, rare earth elements and tungsten.

²²It corresponds to ferrous and nonferrous base metals. The main metals are aluminium, copper, iron, lead, manganese, nickel, tin and zinc.

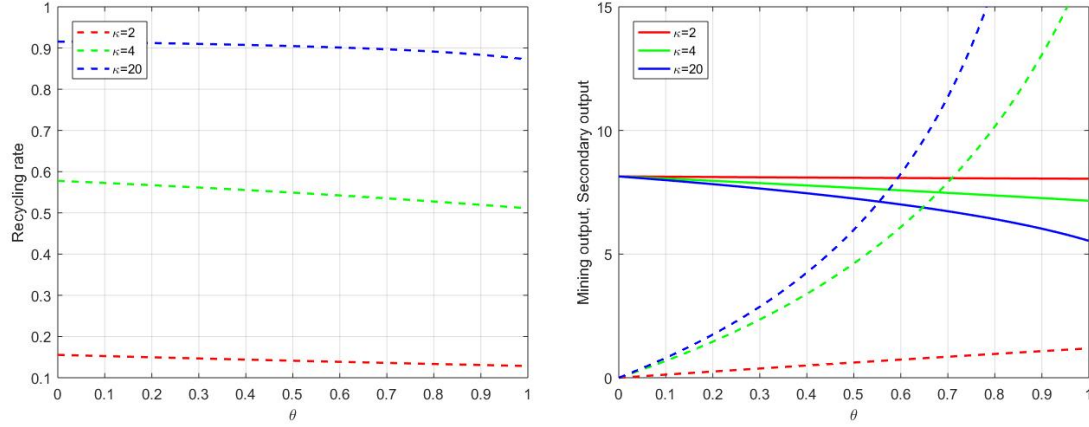


FIGURE II.5 – Recycling rate (left) and outputs with respect to the availability of scrap

For instance, in industrialised countries, base metals can be mobilised with a higher θ . Public policies in the European Union have put in place the principle of Extended Producer Responsibility (EPR) for 25 years to mobilise the proportion of recyclable materials contained in household and similar waste. The principle aims to increase the proportion of θ available for recycling. This instrument is associated with measures aimed at increasing technological efficiency (research tax credits, eco-design). Also, compared to strategic metals, the technology is mastered. Hence, recyclers can have a significant share in the supply of materials ²³.

Proposition 4 : *As long as both the stock of scrap and the recycling technology are not simultaneously high, the share of the secondary supply in the market will be maintained at a low level and recyclers cannot dominate the supply of materials.*

Remark 1 : Differences occur according to whether we consider base or strategic metals, and whether the market is located in emerging or industrialised countries

Remark 2 : In terms of public policy, any incentives to encourage a secondary supply must therefore be considered regarding the initial values of recycling and

²³Regarding the steelmaking industry in Italy and in the United States, the process using recycled material instead of iron ore represents respectively more than 60 per cent and 50 per cent since 2000.

the availability of scrap. For instance, a subsidy for recycling might be positively influential in helping recyclers enter the market, but negatively so in pushing them to dominate the market if scrap is not sufficiently available.

5.3 Recycling technology, availability of scrap and the mining market power

Although recyclers have no individual ability to exert any market power, they all benefit from the non-competitive price that results from the existence of the mining oligopoly. That is why Grant (1999) stated that « the secondary producers recycled too intensively when virgin's price exceeded its marginal cost ». While both material suppliers compete in terms of market share, they are in a situation of collusion regarding market power. More specifically, to observe the effect of recycling on the latter, we use the mark-up defined in the Lerner index as a proxy of market power.

Gaudet and Van Long (2003) showed for a monopoly that $Q^{Y*} < Q^{O*} \leq Q^*$, where Q^{O*} is the optimal output without recycling. This finding illustrates that the secondary supply equals or more than offsets the mining output decrease. Hence, the former case gives $p(Q^*) = p(Q^{O*})$, while we have with the latter case $p(Q^*) < p(Q^{O*})$, indicating that the market price goes towards its competitive level. This is in line with what we found within our two-period model, where $p(Q_2)|_{\theta=0} > p(Q_2)|_{\theta>0}$.

Hence, assuming a constant price elasticity of demand and marginal costs, we have a lower market power such that the following mark-up shows :

$$\frac{p(Q^*) - c}{p(Q^*)} < \frac{p(Q^{O*}) - c}{p(Q^{O*})} \quad (\text{II.21})$$

Since in our case we assume a convex cost function in the mining sector, the mark-up becomes :

$$\frac{p(Q^*) - cQ^{Y*}}{p(Q^*)} = 1 - \frac{cQ^{Y*}}{p(Q^*)} \quad (\text{II.22})$$

In this case, the effect of recycling on the market power becomes more ambiguous and relies on whether the presence of a secondary sector affects the cost of extraction more than the price. Therefore, it recalls the importance of the values of the level of the availability of scrap and the recycling technology to determine the overall effect. Equation (II.10) implies $\frac{\partial S^*}{\partial \theta} > 0$ and $\frac{\partial S^*}{\partial k} > 0$. Since $\frac{\partial p(Q^*)}{\partial S^*} < 0$, we consider that any increase in θ or k pushes the price down to the benefit of the downstream industry, as confirmed at steady state on Figure II.6.

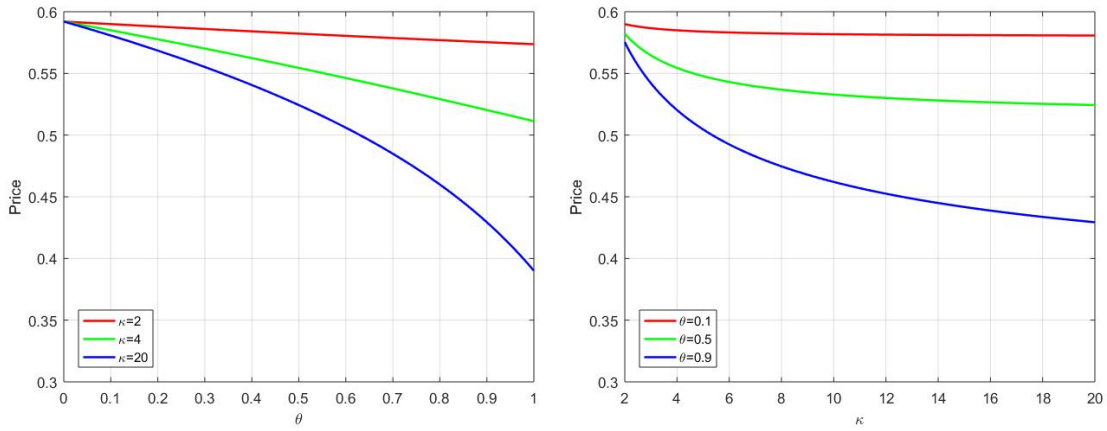


FIGURE II.6 – Evolution of the price with respect to the availability of scrap (left) and the technology of recycling (right)

A recall of the formula expressed in (II.22), implies to see the effect of θ and k on mining output and thus, on the marginal cost of extraction. First, we observe on the left-hand side of Figure II.7 that a greater availability of scrap implies a lower mark-up, no matter the level of recycling. This means that the increase of θ has a greater effect on price than on mining output (*i.e.* on the marginal cost of mining). Formally, with a constant unit cost it yields :

$$c \frac{\partial Q^{Y^*}}{\partial \theta} < \frac{\partial p(Q^*)}{\partial \theta} \quad (\text{II.23})$$

Second, as we observed about competition (subsection 5.2), the significance of the effect differs according to a certain level of θ . More specifically, the role of recycling technology in the decrease of the mark-up seems to be significant only when the availability of scrap is sufficiently high. As illustrated on the right-hand

side of Figure II.7, if there is less than 50 per cent of the material-based products with a short lifespan, the mark-up remains barely constant with the recycling technology.

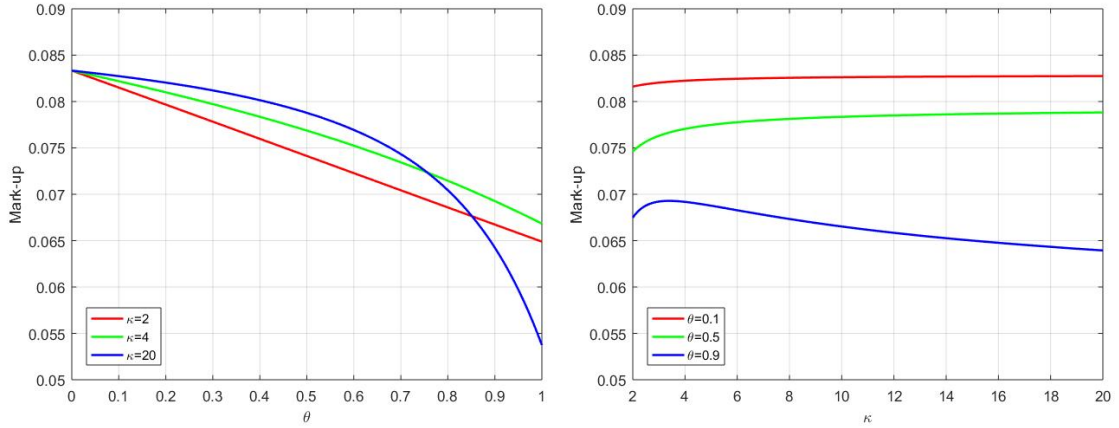


FIGURE II.7 – Evolution of the markup with respect to the availability of scrap (left) and the technology of recycling (right)

Also, we find conditions under which a rise in the mark-up might occur when technology is improved. Below a certain level, a rise in the recycling technology has a greater effect on mining output than on price. Formally, with a constant unit cost it gives a threshold $\bar{k}$ such that :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{If } k < \bar{k} & \rightarrow \frac{\partial Q^{Y*}}{\partial k} > \frac{\partial p(Q^*)}{\partial k} \rightarrow \text{Increase of the mark-up} \\ \text{If } k > \bar{k} & \rightarrow \frac{\partial Q^{Y*}}{\partial k} < \frac{\partial p(Q^*)}{\partial k} \rightarrow \text{Decrease of the mark-up (or no effect with a low } \theta) \end{array} \right. \quad (\text{II.24})$$

As shown in Figure II.7, its value relies on the proportion of scrap available for recycling such that the higher θ is, the lower $\bar{k}$ is. Moreover, several simulations conducted with various values of A show that this technology threshold decreases with the demand scale and can even vanish when the latter is high enough (see Appendix II.D). The explanation comes from the fact that a large demand implies a greater price and thus, the induced greater recycling rate yields a greater secondary supply and pushes the mark-up down.

To sum-up, by dismantling the secondary supply between the availability of scrap and the recycling technology, we highlight a differentiated effect on the market power such that :

Proposition 5 : *Only a combination of both high levels of θ and k can ensure a decrease in the mining market power. While improving the availability of scrap implies a lower market power, enhanced recycling technology might, under a certain threshold, improve it.*

This result is unexpected since both the availability of scrap and technology aim to improve the secondary supply. Such a distinction might be explained by a differentiated effect of each of these two parameters on the secondary supply.

The related literature has already pointed out the possibility of greater market power with the existence of recycling, but only considering potential strategies. As stated by Tirole (1988) in his textbook, or by Gaskins (1974) and Martin (1982) in their respective papers, a mining monopolist might aim to restrain the output to limit the stock of scrap and prevent future competition with recyclers.

6 Discussion about mining strategies

Without recycling, a monopolistic mining firm only faces the demand features of a given market ²⁴. Then, either $k < \tilde{k}$ or $\theta \rightarrow 0$ so that the firm fully benefits from its market power and can easily restrain its output without losing market share. Within an oligopolistic market, the competition comes from the other mining firms. A cooperative strategy will cause the oligopoly to fully benefit from a market power while the profit will be divided according to their respective market share.

²⁴For convenience, we assume a competitive market structure in the downstream industry, although for some materials such as iron ore, the concentration of demand might lead to a thwarted monopsony and reduce the market power of the mining firms (Sourisseau, 2018). In addition, recycling is assumed to be competitive since, unlike mining firms, they have no influence on material prices. They might benefit from a market power but at a local scale when dealing with stakeholders.

In the present case, the mining firms must consider the presence of recycling as new competition since $k > \tilde{k}$ and $\theta > 0$. The previous research on monopolies has shown that a firm might restrain its output to limit future competition with recyclers. It aims at least at maintaining market share, and it also increases market power in the short term. The presence of a greater number of mining firms pressures each of them into also examining the situation in the virgin market. Their respective dilemma lies in whether competition with the secondary sector makes it worth setting up a strategy, or paying attention to the competition within the oligopoly turns out to be more relevant. In our two-period approach we have used the simplest case in which there exists a duopoly. For instance, assuming symmetric firms, a decision to reduce output and anticipate the entry of recyclers would not benefit the first moving firm, unless it knows that the other firm will do so too. Cooperation arises since a unilateral move is unexpected at any time. The case in which the assumption of symmetric mining firms is relaxed might be worth examining. This would lead to a Stackelberg-Stackelberg model in which a duopoly i would also be dominant against j and against recyclers.

However, the decreasing output strategy introduced in the literature leads to a greater price in the short term, creating an incentive to increase expenses for recycling so that a high level of θ can jeopardise such a strategy in terms of market power and market share. As an alternative and still assuming cooperation, the mining firms can increase their output which would aim at restraining the entry of recyclers because of the lower price, especially if they have high fixed costs. The induced greater deposit of available scrap seems to render this strategy risky in the long term. In addition, since under realistic conditions mining output is homogeneous, a product differentiation strategy does not seem to be possible, nor does a potential pricing strategy *à la Bertrand*, so that mining firms can only use a quantity-based strategy.

In the long term, assuming a rise in θ and k , it seems that none of these strategies can prevent mining firms, either in a monopoly or in an oligopoly, from losing market share and a part of their market power. This longer-term perspec-

tive might push firms to undertake an integration strategy to contain the erosion of their initial dominant position. In this context, horizontal integration over the recycling activity would strengthen their position in the upstream industrial process, while vertical integration over the downstream industry would allow them to expand their potential for foreclosure strategies.

7 Conclusion

In this chapter, we have investigated the effect of recycling on the supply of materials through an IO approach. More specifically, our Cournot-Stackelberg model aimed to analyse this effect in terms of market share and market power, according to various parameters that might be different among countries and from a material to another. We pointed out that in allowing recyclers to enter the market and compete with mining firms, a technology threshold must be reached. This threshold is lower when the cost of extraction and/or the availability of scrap is high, and greater when the mining sector is more competitive.

As far as we know, the previous literature has only focused on monopolies, while most of the market structures in this sector seem to be oligopolistic. The effect of a greater number of mining firms is threefold. First, it modifies the technology threshold that allows recyclers to enter the market. Second, it helps the virgin sector to keep and even increase its dominant position against recyclers, while this outcome would also benefit the secondary sector which seems to be more sensitive to the induced rise in the stock, than to a decrease in the price (*i.e.* the stock effect exceeds the price effect). However, the higher market share of the virgin producers might be done at the cost of lower market power for individual firms. Third, the entry of recycling and the induced trade-off between market share and market power imply the existence of potential strategies, and the more competitive the mining sector is, the more difficult that the possibility of establishing them is. In the long term, however, it seems that any strategy cannot

prevent the mining firm(s) from losing market share, because demand will become lower, recycling more efficient and the availability of scrap greater.

Additionally, we have pointed out how recyclers benefit from non-competitive prices while at the same time, any rise in the proportion of scrap available for recycling or any improvement in technology pushes this price down. Assuming a convex cost function, it turns out that the latter way of improving the secondary supply might lead to greater market power. Otherwise, it seems that only a combination of both high levels of scrap availability and recycling technology can ensure a decrease in the market power. Such a combination is also necessary to significantly increase the relative secondary output. Only under these conditions, recyclers can dominate the supply of materials. However, gathering such levels is challenging for public authorities, but is of interest considering the environmental and scarcity issues of the supply of materials within the mining sector.

Annexes II

II.A The mining output with the presence of recycling and proof of Proposition 1

The mining firm i maximises its profit in $t = 2$ such that :

$$\max_{q_2^i} \Pi_2^i = p(q_2^i; q_2^j; S(Q_2^Y))q_2^i - c(q_2^i) \quad (\text{II.25})$$

and the FOC is :

$$p'(Q_2) \times \frac{\partial Q_2}{\partial q_2^i} \times q_2^i + p(Q_2) - c'(q_2^i) = 0. \quad (\text{II.26})$$

With the presence of recyclers in the second period we have $Q_2 = Q_2^Y + S_2$, and the secondary supply is as follows :

$$S_2 = \theta Q_1 \times \frac{\partial \Pi_2^S}{\partial z_2} \quad (\text{II.27})$$

where $\Pi_2^S = (p_2 r(z_2) - z_2) \times \theta Q_1$. Derivating Π_2^S with the following recycling function $r(z_2) = 1 - e^{-kz_2}$, yields :

$$r(\hat{z}_2) = 1 - \frac{1}{kp_2}. \quad (\text{II.28})$$

Given that the inverse demand function is $p(Q_t) = \frac{A}{(Q_2)^\alpha}$ and considering for convenience that $\alpha = 1$, we have :

$$S(Q_2^Y) = \theta Q_1 \left(\frac{Ak - Q_2^Y}{Ak + \theta Q_1} \right) \quad (\text{II.29})$$

where $Q_2^Y = q_2^i + q_2^j$. Hence, Q_2 becomes :

$$Q_2 = Q_2^Y \times \left(\frac{Ak}{Ak + \theta Q_1} \right) + \frac{Ak\theta Q_1}{Ak + \theta Q_1} \quad (\text{II.30})$$

and since $\frac{\partial Q_2}{\partial q_2^i} = \frac{\partial Q_2}{\partial Q_2^Y} \times \frac{\partial Q_2^Y}{\partial q_2^i}$ we obtain :

$$\frac{\partial Q_2}{\partial q_2^i} = \frac{Ak}{Ak + \theta Q_1}. \quad (\text{II.31})$$

Hence, the price in $t = 2$ is given by :

$$p(Q_2) = c'(Q_2^Y) + \frac{1}{2} \times \frac{AQ_2^Y}{(Q_2^Y + S_2)^2} \times \frac{Ak}{Ak + \theta Q_1} \quad (\text{II.32})$$

from which we can infer that $p(Q_2)|_{\theta=0} > p(Q_2)|_{\theta>0}$.

By extending the analysis with n mining firms, we have :

$$p(Q_2) = c'(Q_2^Y) + \frac{1}{n} \times \frac{AQ_2^Y}{(Q_2^Y + S_2)^2} \times \frac{Ak}{Ak + \theta Q_1} \quad (\text{II.33})$$

which yields :

$$A = c'(Q_2^Y) \times \left(\frac{AkQ_2^Y}{Ak + \theta Q_1} + \frac{Ak\theta Q_1}{Ak + \theta Q_1} \right) + \left[\frac{1}{n} \times \frac{AQ_2^Y}{\left(\frac{AkQ_2^Y}{Ak + \theta Q_1} + \frac{Ak\theta Q_1}{Ak + \theta Q_1} \right)} \times \frac{Ak}{Ak + \theta Q_1} \right] \quad (\text{II.34})$$

The implicit form of Q_2^Y prevent us from directly observe the effect of n on the mining sector. However, we observe that if n increases and Q_2^Y is reduced, a contradiction occurs because the right-hand side decreases while it must offset the left-hand side to maintain A constant. Therefore, we have $\frac{\partial Q_2^Y}{\partial n} > 0$ (*i.e.* Proposition 1).

To see the effect on individual firms, we replace Q_2^Y by nq^* into (II.34) to obtain $A = F(n; q^*)$. Using the implicit function theorem we have :

$$F'_n dn + F'_{q^*} dq^* = A \quad (\text{II.35})$$

and then :

$$\frac{dq^*}{dn} = -\frac{F'_n}{F'_{q^*}} + A. \quad (\text{II.36})$$

We denote $a = \frac{Ak}{Ak+\theta Q_1}$ and $b = \frac{Ak\theta Q_1}{Ak+\theta Q_1}$, so :

$$A = c'_2(anq^* + b) + \left(\frac{Aaq^*}{anq^* + b} \right). \quad (\text{II.37})$$

Thus, it yields :

$$F'_{q^*} = ac'_2n + \frac{Aab}{(anq^* + b)^2} \quad (\text{II.38})$$

and

$$F'_n = aq^* \times \left(c'_2 - \frac{Aaq^*}{(anq^* + b)^2} \right). \quad (\text{II.39})$$

While we have $F'_{q^*} > 0$, the result of F'_n is more ambiguous such that :

$$\begin{cases} \text{If } c'_2 > \frac{Aaq^*}{(anq^* + b)^2} & \rightarrow F'_n > 0 & \text{and then } \frac{dq^*}{dn} < 0. \\ \text{If } c'_2 < \frac{Aaq^*}{(anq^* + b)^2} & \rightarrow F'_n < 0 & \text{and then } \frac{dq^*}{dn} > 0. \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

More specifically, the effect of a more competitive mining sector on individual firms' output strongly relies on the value of θ and k (*i.e.* the magnitude of the secondary supply), as well as on the parameter A .

II.B Proof of Proposition 2

To facilitate the computation of an explicit value of Q^{Y*} and the analysis of $\tilde{k}$, we assume that the firms consider $r(z) = 1$ so that the level of recycling is only

embodied by θ , and also depends on Q_{t-1} . We determine the mining output equilibrium resulting from a Cournot competition holding between the n firms from the oligopoly. For convenience, the inverse demand function is assumed to be linear as $p(Q_t) = 1 - Q_t$. Considering the same cost structure with c as the constant unit cost, the intertemporal and simplest profit function of firm i is :

$$\Pi^i = (1 - Q_t - c)q_t^i + \sum_{\tau=1}^{\infty} \delta^{t+\tau} (1 - Q_{t+\tau} - c)q_{t+\tau}^i \quad (\text{II.41})$$

where δ is discount factor. From the FOC and by aggregating the n firms, we have :

$$Q_t^Y = n - nQ_t^Y - n\theta Q_{t-1} - nc - \sum_{\tau=1}^T (\delta\theta)^\tau Q_{t+\tau}^Y. \quad (\text{II.42})$$

At steady state, the equilibrium becomes :

$$Q^{Y*} = n(1 - c) \times \left(1 + \frac{n}{1 - \theta} + \frac{\delta\theta}{1 - \delta\theta} \right)^{-1} \quad (\text{II.43})$$

Since with $\theta = 0$ we have the Cournot equilibrium generalised with n firms as follows :

$$Q^{Y*}|_{\theta=0} = \frac{n(1 - c)}{n + 1} \quad (\text{II.44})$$

we obtain :

$$Q^{Y*}|_{\theta=0} > Q^{Y*}|_{\theta>0} \quad (\text{II.45})$$

The negative effect of recycling, which is here embodied by our parameter θ , on the mining firms's output is confirmed.

Before the arrival of recyclers into the market, we have a technology threshold as follows :

$$\tilde{k} = \frac{1}{p(Q^{Y*})} \quad (\text{II.46})$$

Assuming $\delta = 1$, we have $Q^{Y*} = \frac{n(1-c)(1-\theta)}{1+n}$ which we can include in the

technology threshold to allow $r(\hat{z}) > 0$. It yields :

$$\tilde{k} = \frac{1}{1 - \left(\frac{n(1-c)(1-\theta)}{1+n} \right)}. \quad (\text{II.47})$$

Hence :

$$\tilde{k} = \frac{1+n}{1+n(\theta+c(1-\theta))}. \quad (\text{II.48})$$

Since $n > 1$ and, regarding our demand function, $c < 1$, we have $n > nc$ and thus, $\frac{\partial \tilde{k}}{\partial \theta} < 0$. From (II.48), we also observe that $\frac{\partial \tilde{k}}{\partial c} < 0$ and $\frac{\partial \tilde{k}}{\partial n} > 0$.

II.C The steady state equilibrium

The intertemporal profit function of the mining firm i is :

$$\Pi^i = [p(Q_t)q_t^i - c(q_t^i)] + \sum_{\tau=1}^{\infty} \delta^\tau [p(Q_{t+\tau})q_{t+\tau}^i - c(q_{t+\tau}^i)] \quad (\text{II.49})$$

and the FOC with n firms is given by :

$$p'_t(Q_t)Q_t^Y \left(1 + \theta Q_{t-1} \frac{\partial r(\hat{z}_t)}{\partial Q_t} \right) + np(Q_t) - c'(q_t^Y) + \sum_{\tau=1}^{\infty} \delta^\tau p'_{t+\tau}(Q_{t+\tau})Q_{t+\tau}^Y \frac{\partial Q_{t+\tau}}{\partial Q_t} = 0. \quad (\text{II.50})$$

II.C.1 Equation (II.16)

Consider the balance growth path, where :

$$Q_t = Q_0 g^t, \quad (\text{II.51})$$

$$Q_t^Y = Q_0^Y g^t \quad (\text{II.52})$$

for some $g_q > 1$.

Since :

$$Q_t = Q_t^Y + \theta r(\hat{z}_t)Q_{t-1} \quad (\text{II.53})$$

we have :

$$Q_t^Y = Q_t - \theta r(\hat{z}_t) Q_{t-1} \quad (\text{II.54})$$

$$= Q_0 g^t - \theta r(z_t) Q_0 g^{t-1} \quad (\text{II.55})$$

$$= Q_0 g^t \left(1 - \theta \frac{r(\hat{z}_t)}{g} \right) \quad (\text{II.56})$$

$$= Q_t \left(1 - \theta \frac{r(\hat{z}_t)}{g} \right). \quad (\text{II.57})$$

With $p(Q_t) = \frac{A g^t}{Q_t^\alpha}$, observe that for any Q_t , it yields :

$$p'(Q_t) Q_t = -\alpha p(Q_t). \quad (\text{II.58})$$

Hence :

$$p'_t(Q_t) Q_t^Y = p'_t(Q_t) \times Q_t \left(1 - \theta \frac{r(\hat{z}_t)}{g} \right) \quad (\text{II.59})$$

$$= -\alpha p(Q_t) \left(1 - \frac{\theta}{g} + \frac{\theta}{k g p(Q_t)} \right). \quad (\text{II.60})$$

II.C.2 Equation (II.17)

For any t , since we have $r(\hat{z}_t) = 1 - \frac{1}{k p(Q_t)}$, then :

$$\frac{\partial r(\hat{z}_t)}{\partial Q_t} = -\frac{\alpha}{k Q_t p(Q_t)} \quad (\text{II.61})$$

Hence :

$$1 + \theta Q_{t-1} \frac{\partial r(\hat{z}_t)}{\partial Q_t} = 1 - \frac{\alpha \theta}{k g p(Q_t)}. \quad (\text{II.62})$$

II.C.3 Equation (II.18)

Since we know that a part of the total output of the industry in t is back on the market in $t + 1$ through the recycling process, we observe that for any $\tau > 0$

we have :

$$\frac{\partial r(\hat{z}_{t+\tau})}{\partial Q_t} = \frac{\partial r(\hat{z}_{t+\tau})}{\partial Q_{t+\tau}} \times \frac{\partial Q_{t+\tau}}{\partial Q_t}. \quad (\text{II.63})$$

With $Q_{t+\tau} = Q_{t+\tau}^Y + \theta r(\hat{z}_{t+\tau})Q_{t+\tau-1}$, it yields :

$$\frac{\partial Q_{t+\tau}}{\partial Q_t} = \theta r(\hat{z}_{t+\tau}) \frac{\partial Q_{t+\tau-1}}{\partial Q_t} + \theta Q_{t+\tau-1} \frac{\partial r(\hat{z}_{t+\tau})}{\partial Q_t}. \quad (\text{II.64})$$

Hence :

$$\frac{\partial r(\hat{z}_{t+\tau})}{\partial Q_t} = \frac{\partial r(\hat{z}_{t+\tau})}{\partial Q_{t+\tau}} \times \frac{\partial Q_{t+\tau}}{\partial Q_t} \quad (\text{II.65})$$

$$= \frac{\partial r(\hat{z}_{t+\tau})}{\partial Q_{t+\tau}} \times \theta r(\hat{z}_{t+\tau}) \frac{\partial Q_{t+\tau-1}}{\partial Q_t} + \frac{\partial r(\hat{z}_{t+\tau})}{\partial Q_{t+\tau}} \times \theta Q_{t+\tau-1} \frac{\partial r(\hat{z}_{t+\tau})}{\partial Q_t} \quad (\text{II.66})$$

which implies :

$$\left(1 - \frac{\partial r(\hat{z}_{t+\tau})}{\partial Q_{t+\tau}} \times \theta Q_{t+\tau-1}\right) \frac{\partial r(\hat{z}_{t+\tau})}{\partial Q_t} = \frac{\partial r(\hat{z}_{t+\tau})}{\partial Q_{t+\tau}} \times \theta r(\hat{z}_{t+\tau}) \frac{\partial Q_{t+\tau-1}}{\partial Q_t}. \quad (\text{II.67})$$

Hence we have :

$$\frac{\partial r(\hat{z}_{t+\tau})}{\partial Q_t} = \frac{\frac{\partial r(\hat{z}_{t+\tau})}{\partial Q_{t+\tau}} \times \theta r(\hat{z}_{t+\tau})}{1 - \frac{\partial r(\hat{z}_{t+\tau})}{\partial Q_{t+\tau}} \times \theta Q_{t+\tau-1}} \times \frac{\partial Q_{t+\tau-1}}{\partial Q_t}. \quad (\text{II.68})$$

Finally, considering that $\frac{\partial Q_{t+\tau}}{\partial Q_t} = e_{t,\tau}$, we obtain :

$$e_{t,\tau} = \theta r(\hat{z}_{t+\tau}) \frac{\partial Q_{t+\tau-1}}{\partial Q_t} + \theta Q_{t+\tau-1} \frac{\partial r(\hat{z}_{t+\tau})}{\partial Q_t} \quad (\text{II.69})$$

$$= \theta r(\hat{z}_{t+\tau}) \frac{\partial Q_{t+\tau-1}}{\partial Q_t} + \theta Q_{t+\tau-1} \times \frac{\frac{\partial r(\hat{z}_{t+\tau})}{\partial Q_{t+\tau}} \times \theta r(\hat{z}_{t+\tau})}{1 - \frac{\partial r(\hat{z}_{t+\tau})}{\partial Q_{t+\tau}} \times \theta Q_{t+\tau-1}} \times \frac{\partial Q_{t+\tau-1}}{\partial Q_t} \quad (\text{II.70})$$

$$= \theta r(\hat{z}_{t+\tau}) \left(1 + \frac{\frac{\partial r(\hat{z}_{t+\tau})}{\partial Q_{t+\tau}} \times \theta Q_{t+\tau-1}}{1 - \frac{\partial r(\hat{z}_{t+\tau})}{\partial Q_{t+\tau}} \times \theta Q_{t+\tau-1}}\right) \frac{\partial Q_{t+\tau-1}}{\partial Q_t} \quad (\text{II.71})$$

$$= \frac{\theta r(\hat{z}_{t+\tau})}{1 - \frac{\partial r(\hat{z}_{t+\tau})}{\partial Q_{t+\tau}} \times \theta Q_{t+\tau-1}} \frac{\partial Q_{t+\tau-1}}{\partial Q_t}. \quad (\text{II.72})$$

At steady state we have for $\tau \geq 1$:

$$e_\tau = g \frac{\theta r(z^*)}{1 - d^* \times \theta Q^*} \times \frac{\partial Q_{t+\tau-1}}{\partial Q_t} \quad (\text{II.73})$$

$$= g \frac{\theta r(\hat{z})}{1 - d^* \times \theta Q^*} e_{\tau-1} \quad (\text{II.74})$$

where $d^* = \frac{\partial r(z^*)}{\partial Q^t}$. Observe that when $\tau = 0$, $e_\tau = e_0 = 1$. This outcome implies for any $\tau \geq 1$ that we have :

$$e_\tau = \left(g \frac{\theta r(\hat{z})}{1 - d^* \times \theta Q^*} \right)^2 e_{\tau-2} \quad (\text{II.75})$$

$$= \left(g \frac{\theta r(\hat{z})}{1 - d^* \times \theta Q^*} \right)^\tau \quad (\text{II.76})$$

$$= g^\tau \left[\frac{\theta(kp(Q^*) - 1)}{kp(Q^*)g + \alpha\theta} \right]^\tau. \quad (\text{II.77})$$

II.D Scale of demand and mining market power

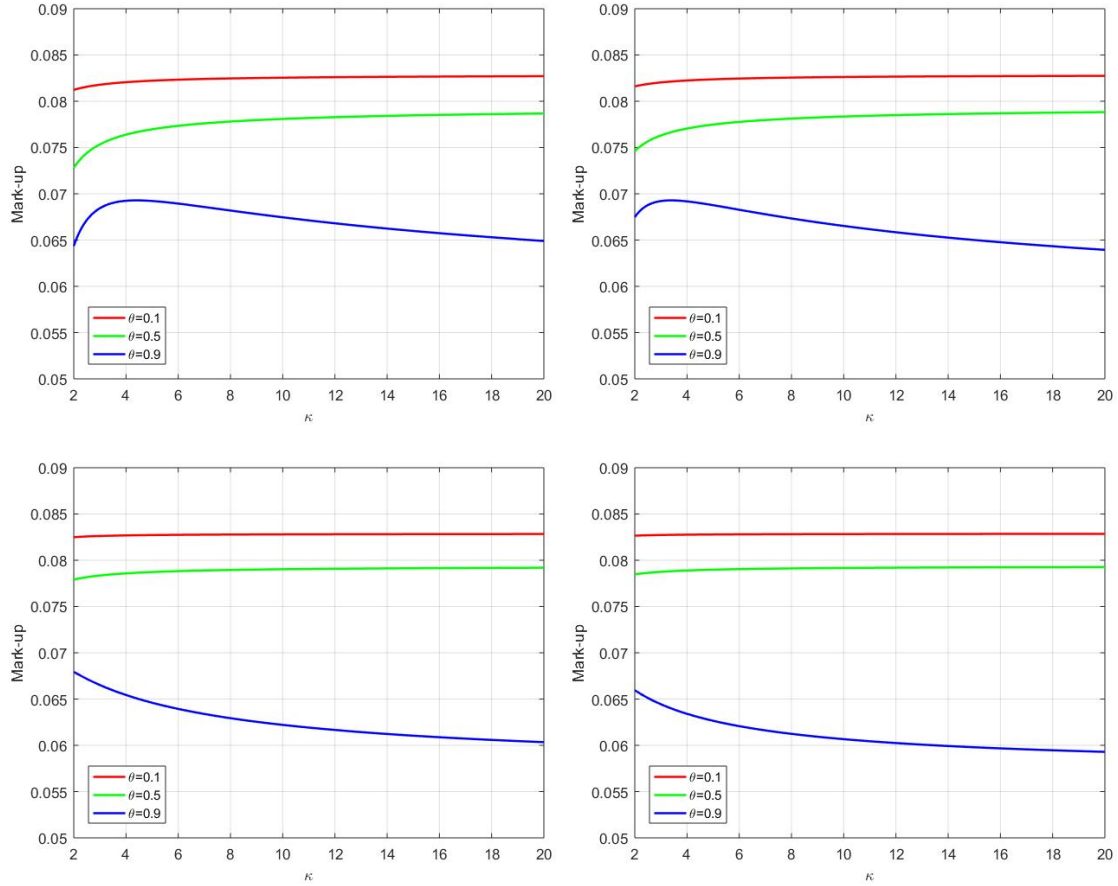


FIGURE II.8 – Evolution of the mark-up with respect to the recycling technology and according to various values of the demand scale : $A=0.8$ on top-left ; $A=1$ on top-right ; $A=5$ on bottom-left ; $A=10$ on bottom-right)

Chapitre III

Welfare and public policies within a recycling-mining competition framework

Abstract

While the literature studying the competition between mining firms and recyclers mostly focused on the effect on the mining market power, herein we consider in this competition framework the existence of a second market distortion : the environmental externalities. We show that by considering such externalities, it strenghtens the need for a greater secondary supply, since recycling addresses both issues of market power and pollution and thus, increases welfare. Regarding public policies, unlike a pollution-based tax on mining extraction, a subsdidy allows recyclers to gain market shares. This is even more striking for countries with low initial level of recycling. In addition, the decrease in the CO₂ emissions turns out to be very significant compared to a tax. This latter policy implies a decrease of the mining ouput that cannot be offset by recyclers since their constraint of stock becomes more stringent.

Keywords : recycling, mining extraction, welfare, subsidy, environmental tax, iron and steel industry

1 Introduction

After extraction, materials are spread out over various consumption sectors and integrated into buildings and infrastructures, means of transport, electronic devices, home appliances, etc. Their end-of-life is reached once products they are integrated into are considered as waste. Unlike landfilling and incineration, recycling (as a way of managing waste) allows materials to be returned on the market for another lifespan, that depends on the products into which the materials will be integrated. Hence, competition arises between recyclers and the mining sector. It turns out that by supplying industrial sectors with virgin materials, the mining firms create their own future competition with recyclers that supply secondary materials. In the literature, an analysis of the effect of recycling on a non-competitive mining sector has been provided through the Alcoa antitrust-case and other more recent studies ¹. Results in terms of how competition is affected differ according to various parameters such as the market structure of both mining extraction and recycling, the technology involved in recycling, the availability of scrap, the growth of demand and the structure of costs. In terms of social welfare, analysis mostly focuses on the extent to which recycling shows a pro-competitive effect by reducing the mining companies' market power. Indeed, a market distortion exists since resource extraction induces high fixed costs and then, the market structure of the mining sector appears to be non-competitive for most materials (Kesler and Simon, 2015) ². The concentration of supply allows the mining firms to potentially undertake strategies that are either intended to deter recyclers from entering the market (and thus allow the mining firms to keep their market share), or that are designed to maintain and even increase the firms' market power. However, while the literature addresses the issue of how recycling affects the non-competitive mi-

¹For further details, see *e.g.* Gaskins (1974), Swan (1980), Martin (1982), Gaudet and Van Long (2003) Ba and Mahenc (2018), Sourisseau *et al.* (2018)

²For instance, in 2011, only two firms held more than 60 per cent of market shares for platinum. There were five companies holding 42 per cent of the market shares for aluminium, while ten mining companies produced more than 50 per cent of the world production of copper (Wan and Boyce, 2014).

ning sector, as far as we know it has barely considered a second market distortion that is often related to mining : the environmental externalities ³.

Regarding the gap between mining and recycling, the internalisation of external costs might have consequences over the supply of materials. Hence, in this chapter we intend to include the relative environmental cost of mining within the framework of competition between the mining firms and recyclers. As a consequence, this chapter highlights the role of public policies in such a framework, since they aim to address both market distortions related to pollution and market power. More specifically, although they might differ in their initial purpose, we study the effects of two standard policies on the supply of materials in terms of market share, level of externalities and social welfare. First, as the most standard way of internalising pollution, we consider the potential effects of an environmental tax to the mining firms, in the context of the recycling-mining competition framework. Second, since we assume that fostering recycling could make the supply of materials more competitive and thus, could address the distortion related to the mining market power, we consider the effect that a subsidy applied to recyclers might have. These two policies are the most likely to be used by public authorities in a context whereby home recyclers might compete with foreign mining firms to provide materials to manufacturers. In this case, the environmental taxation would take the form of a border-tax on materials or products, according to, for instance, their CO₂ content.

The specific relationship between the two suppliers (*i.e.* the fact that the mining output turns out to be the recyclers' input) generates uncertainties about the real effect of these policies. To reflect the various context of competition between mining and recycling, we apply our model to the iron and steel industry in a few countries.

³Few decades ago, the importance of taking into consideration the deterioration of the physical environment associated with the extraction of natural resources was pointed out by Barnett and Morse (1963) and Krutilla (1967). They mostly referred to the effect on the landscape, water and atmospheric quality, and it is nowadays well documented in the literature.

This industry is chosen because it is one in which recycling is well developed since technology to extract steel scrap from material-based products is well established in several countries. Additionally, the non-competitive market structure of the mining industry is well recognised, since three to four firms hold more than 70 per cent of the worldwide exports of iron ore (UNCTAD, 2014). In addition, the iron and steel sector is one of the most intensive in terms of material and energy consumption ⁴. Producing steel accounts for 7 per cent of anthropogenic CO₂ emissions; this rises to 10 per cent when mining and transportation are included in the calculations (IEA, 2007). Most CO₂ emissions result from the primary steel produced from iron ore and coking coal. This process is also responsible for significant release of Nitrogen Oxides (NO_x), Sulphur Oxides (SO_x) and Particulate Matter (PM). Hence, a structural switch to the secondary production process, which uses ferrous scrap as its main input, is necessary ⁵. Such a distinction in the steelmaking process (*i.e.* whether the primary or secondary method is employed) leads us to consider that environmental externalities from ore extraction are added to those required by the process of transforming ore into steel. In this chapter, these externalities are net from those required by recycling and the secondary steelmaking process. Given that recycling embodies other advantages in terms of resource preservation and economic opportunities, we consider a structural switch as being of great interest to public authorities. To this end, these public authorities would be required to overcome their own barriers associated with recycling (*i.e.* the availability of scrap and technology).

Herein we show that by considering environmental externalities strengthens the relative advantage of recycling compared to mining. Thus, public policies that

⁴Other materials such as the rare-earth elements generate important environmental externalities when they are extracted. The related market structure for this material is also well known as non-competitive. However, the recycling process is in its early stages, so that data are rather complex to obtain.

⁵Other pollution abatement options in steelmaking are associated with an improvement of energy efficiency, the use of less CO₂ content input or the implementation of breakthrough technology like the carbon capture and sequestration process (Gale and Freund (2000); Neuhoff *et al.* (2010)).

might address both issues of pollution and market power are more than necessary. Unlike a pollution-based tax on mining, we highlight the gain in market share for recyclers thanks to a subsidy, especially for countries with lower initial level of recycling such as Japan and Germany. In addition, the decrease in the CO₂ emissions turns out to be very significant compared to the tax. This latter policy implies a decrease of the mining output that cannot be offset by recyclers since their constraint of stock, becomes more stringent.

This chapter is organized as follows. Section 2 gives an overview of the economic literature related to recycling, in particular public policies which aim at stimulating such activity. Section 3 provides the model based on Sourisseau *et al.* (2018) in which we include environmental externalities and a welfare-based analysis. Section 4 introduces public policies in the model and Section 5 put emphasis on the iron and steel industry, giving an empirical dimension to this chapter. Section 6 concludes.

2 Recycling within the economic literature

Among the earliest empirical research related to recycling of metal materials (*e.g.* aluminium, lead and copper), Grace *et al.* (1978) suggested that growth rates in consumption, end-use structure and factor endowment might create divergences between recycling rates. By focusing on aluminium, Carlsen (1980) explained variations in the recycling ratio of aluminium in the US with the cost of energy, the price of aluminium relatively to the price of scrap and the level of industrial production. More globally, the economic literature related to recycling can be shared according to whether recycling is taken as a waste management policy, or whether recyclers are considered as a supplier of a secondary material.

2.1 Recycling as a substitute for disposal

In the downstream value chain, recycling is considered a waste management policy as it is a substitute for disposal. In his theoretical approach, Lusky (1976) desi-

gned a model with these two ways of dealing with waste. Assuming disposal as a least-cost option and recycling as a positive effect upon the consumer's utility function, he concludes that the optimal solution calls for a simultaneous decrease in the consumption of the original goods and an increase in the production and consumption of the recycled goods. In order to address both issues, the regulator can combine a subsidy granted to recyclers and a tax on the consumed goods; this is commonly referred to as a deposit-refund system. In practice, deposit-refund systems are set-up in many countries as well as in California, Oregon and Michigan in the United States (US). However, their exact application might differ. For instance, 44 states in the US have some kind of deposit-refund program for lead acid batteries (Walls, 2011). In the EU, the deposit-refund approach is related to the concept of « extended producer responsibility » (EPR). According to OECD (2001), EPR is such that « producers accept significant responsibility - financial and/or physical - for the treatment or disposal of post-consumer products. Assigning such responsibility could in principle provide incentives to prevent wastes at the source, promote product design for the environment and support the achievement of public recycling and materials management goals ».

In many theoretical and empirical studies, a deposit-refund system is compared with other instruments. When solid waste is unpriced, the private market equilibrium leads to generating too much waste and too little recycling compared to the social optimum. The overall result is that only a deposit-refund system achieves this social optimum. Levying a tax on solid waste disposal may increase illegal disposal, and introducing a recycled content standard can lead to an inefficient use of other production factors such as labour. Thus, in order to avoid these unintended effects, additional taxes or subsidies are necessary ⁶. Using data from the US in 1990, Palmer *et al.* (1997) validated their theoretical approach : targets in waste reduction were reached with a deposit-refund system for half the marginal social cost of a recycling subsidy or disposal fee.

⁶For further details, see *e.g.* Dinan (1993), Fullerton and Kinnaman (1995), Walls and Palmer (1997), Palmer *et al.* (1997), Walls (2011)

Sigman (1995) studied four ways to stimulate recycling (*i.e.* a tax on the use of virgin materials, a deposit-refund system, a subsidy for recycling, and a recycled content standard), since she considered that policies applied to disposal are « difficult to enforce » and may cause illegal dumping. Based on the market of lead-acid vehicle batteries, she showed that all these policy alternatives were effective in reducing lead disposal, but also that their associated costs varied widely. For instance, improving recycling through a subsidy turned out to be the costliest. Since Sigman (1995) conclusions showed that the recovery of lead from automobile batteries is sensitive to prices, her work went against other studies in which recycling policies aimed at altering prices only had limited success because of the low price elasticity of the secondary supply.

Indeed, focusing on wastepaper recovery in the US between 1947 and 1973, Edwards and Pearce (1978) concluded that if recycling is to be encouraged for any reason, methods other than direct price manipulation must be used. Slade (1980) introduced price subsidies to secondary production to study the effect on copper recycling rates. Her results showed that approximately 45 million dollars of spending per year led to a 0.5 per cent increase of the copper market share produced from old scrap. Such a result seems quite disappointing and « may not be worth the cost of the subsidy ». More recently, Blomberg and Soderholm (2009) studied the secondary aluminium supply using European data. They also concluded the limited impact of price-based policies on aluminium recycling rates, particularly because of the low estimated price elasticity of the secondary aluminium supply.

Unlike this stream of literature, we consider in this chapter that the magnitude of the secondary sector also relies on the scrap deposit available for recycling. Since it is *in fine* determined by a non-competitive mining supply, this chapter focuses on the upstream part of the value chain of materials, allowing us to encompass all components of the secondary sector (*i.e.* the recycling rate and scrap deposit). While a recycling subsidy was compared with an environmental tax applied to waste disposal, herein we introduce this latter policy to the « upstream alternative » to recycling : mining activity.

2.2 Recycling as a substitute for mining

In the absence of recycling and under perfect competition in the extraction sector, an optimal emission tax must equal the marginal social cost of the polluting emissions (*i.e.* the Pigovian tax). A large body of literature showed interest in public policies focusing on environmental externalities in the context of non-competitive extraction sectors. The standard findings demonstrated that an optimal tax rate is lower than the marginal damage in order to consider the underproduction of the monopolist (Buchanan, 1969). Within an oligopolistic market structure, Katsoulacos and Xepapadeas (1996) demonstrated that, given the increase in the firms numbers which pushes the output to its competitive level, the optimal emission tax rate should also increase and be closer to the Pigovian level ⁷.

Ebert (1992) and Simpson (1995) investigated the effect of emission taxes on a Cournot oligopoly and agreed on decreasing aggregate output with the tax. Under a symmetric structure studied by Ebert (1992), profits go down, and the (second-best) optimal emission tax rate appears to be lower under an oligopoly than under perfect competition. Considering a case in which the most efficient firm is also the least polluting, Simpson (1995) estimated that such a tax should be higher than the marginal damage since a transfer of production from the less efficient to the most efficient occurs. David (2007) qualified this result given that the most polluting technology is usually the least expensive, so the most efficient firm is also the most polluting. Such an assumption better fits with the competition between recyclers and the mining firms. The extraction of virgin materials is usually less costly than the production of a recycled substitute, and mining generates more environmental externalities than recycling. David and Sinclair-Desgagné (2010) also considered the existence of two simultaneous price distortions but in a context in which abatement goods and services are provided by an oligopolistic eco-industry to a polluting industry. Modelling a combination of a tax on polluting emissions with an abatement subsidy, they showed that the price distortion related to the

⁷For further details, see Requate (2005) who performed a comprehensive literature review concerning environmental policies and non-competitive market structure.

market power remained, so this policy could not achieve the first-best.

Herein, the context is rather different. Unlike this stream of literature, we consider that market power and environmental externality distortions come from the oligopolistic mining sector. Thus, increasing the share of recycling in the supply of materials might address both of these distortions, since recyclers are in a competitive market structure and the pollution content of their output is lower. However, by controlling the quantity of extracted materials, mining firms define the capacity constraint of recycling. This calls into question the actual effect of public policies that aim to foster recycling.

To the best of our knowledge, very little theoretical work has been done regarding such a recycling-mining competition framework and the effect of public policies. Overlooking the gap of environmental externalities between both activities has misled conclusions about welfare. Based on the Alcoa case, Grant (1999) estimated that recycling can be negative for welfare because some recycled materials are produced at a marginal cost exceeding that of the mining sector. In this context, the use of public policies turns out to be irrelevant. We show in this chapter that an internalisation of environmental damages caused by mining activity, relative to damages from recycling, would probably conflict with, or even refute, Grant's result on welfare. In his model Hoel (1978) demonstrated that considering environmental externalities may make it optimal to leave some of a finite resource stock unextracted, since the optimal path of extraction will be affected by the existence of environmental effects. However, Hoel (1978) disregarded the possibility that both recycling and mining activities can take place simultaneously, as well as the effect of potential public policies. Within a general equilibrium model that includes environmental externalities from the production of a virgin good, De Beir *et al.* (2007) studied to what extent a recycling sector could be subsidised. They showed that if this activity is profitable enough, the subsidy should vanish and, under certain conditions, can take the form of a tax. In addition, they demonstrated how efficient recycling helps reduce pollution. We share this latter point of

conclusion, since by getting more dominant in the supply of materials, recyclers lower the market share of mining firms and the related environmental externalities. However, their model was based on a competitive mining industry, and, thus, did not consider that recyclers could also address the market power issue. In a partial equilibrium model, De Beir and Girmens (2009) compared a pollution tax on mining with a subsidy on recycling and determined that the effect of a subsidy depends on the slopes of the demand curve and the recycler's supply curve. Their results also highlighted the undetermined effect of such policies on welfare, since a decrease in pollution might be offset by a simultaneous decrease in overall output. Similarly, through a partial equilibrium model, we highlight that both tax and subsidy have a positive effect on pollution. To go further regarding the effect of policies on welfare, we apply our recycling-mining competition model to the iron and steel industry. In addition, our model differs from the previous literature in that we consider the mining sector as oligopolistic rather than dominated by a single firm.

3 The Model

We consider in a non-renewable resource market, n symmetric mining firms with the same size and cost structure. The firms own an equivalent share of the deposit and, extract and sell ore to a competitive industry in t . The competition holds with a fringe of competitive recyclers to supply this industry. To determine our equilibrium, we use a Cournot-Stackelberg model as in Sourisseau *et al.* (2018), since we assume that the mining firms have a temporal and informational advantage over recyclers. It is a three-stage model that requires to dwell first on the recycling sector. Indeed, the standard Stackelberg game is such that recyclers equalise their marginal cost with the given price, by considering mining production as given. Thus, mining firms integrate recyclers' behaviour (*i.e.* the reaction function) to determine their respective optimal output through a Cournot competition. This yields the optimal mining output used to determine the optimal secondary output

and, then, the entire supply of materials.

3.1 The secondary sector

We denote z_t as the expenditures of collecting, sorting, and processing a unit of scrap to deliver a recycled material in t . This allows us to define $r(z_t)$ as a recycling function that reflects the ability of recyclers to produce a secondary output with respect to the available stock of waste in t . This stock results from a previous production Q_{t-1} and a parameter θ ranging between 0 and 1. It represents the proportion of material-based products that, after being consumed and maybe repaired and/or re-used, reach their end-of-life and become waste ⁸. Hence, the secondary supply ⁹ is $S_t = r(z_t) \times \theta Q_{t-1}$ and the following properties apply :

- $S_0 = 0$ since there is no waste to collect and thus, materials to recycle. In $t = 0$, the only suppliers are the mining firms
- $0 < r(z_t) < 1$ shows that waste recycling cannot exceed the stock (*i.e.* $S_t < \theta Q_{t-1}$)
- $r(0) = 0$ and $\lim_{z_t \rightarrow +\infty} r(z_t) = 1$
- $1 - r(z)$ reflects material leaks during the recycling process (*i.e.* the depreciation phenomenon), and the waste that is sent to landfills and incineration, rather than collected by recyclers.

Each period t , recyclers maximise their profit as follows :

$$\Pi^S = (p_t r(z_t) - z_t) \times \theta Q_{t-1} \quad (\text{III.1})$$

⁸For convenience, in this chapter, we consider only one flow of products that become scrap after one period, which we consider to be the lifespan of the product. The possibility of using two flows of products seems more realistic but highly complicates the model. The stock of scrap in t would be as follows : $\bar{q}_t = \gamma Q_{t-1} + (1 - \gamma)Q_{t-\sigma}$, where γ is the proportion of short lifespan products in the economy, and σ is the relative lifespan of the long lifespan products compared to the short ones.

⁹As in the previous related literature, for the sake of simplicity, we maintain the assumption that both virgin and recycled materials are perfectly substitutable.

We use the functional form of $r(z)$ from Swan (1980), so that $r(z_t) = 1 - e^{-kz_t}$. The parameter $1 \leq k < +\infty$ is exogeneous and captures a level of technology in the recycling process¹⁰. The higher k is, the more efficient recycling will be, since it becomes easier to separate materials and relies less on the quality of the waste composition. This functional form of $r(z)$ allows us to find the optimal solution which we consider as the marginal cost of recycling $\hat{z}_t = \frac{\ln k + \ln p_t}{k}$. It verifies that $\frac{\partial \Pi^S}{\partial z} = 0$ and gives the following optimal level of recycling :

$$r(\hat{z}_t) = 1 - \frac{1}{kp_t} \quad (\text{III.2})$$

The recycling rate increases with the price and more efficient technology. Considering that the stock of scrap is given and defines the capacity constraint of recyclers, in each period t we have the secondary supply as follows :

$$S_t = \left(1 - \frac{1}{kp(Q_t)}\right) \times \theta_{Q_{t-1}}(Q_{t-1}^Y; S_{t-1}) \quad (\text{III.3})$$

where we have the total supply of materials defined as $Q_t = Q_t^Y + S_t$ and $Q_{\{t;t-1\}}^Y$ is the mining output.

3.2 Mining output and equilibrium

The mining firm i is involved in a double competition as a Cournot player with the $n - 1$ other mining firms and as one of the leaders against recyclers in the Stackelberg game. To determine its optimal output, it integrates the secondary supply as follows :

$$\max_{q^i} \Pi^i = p(Q_t^{Y-i} + q_t^i + S_t)q_t^i - c(q_t^i) + \sum_{\tau=1}^{\infty} \delta^\tau p(Q_{t+\tau})q_{t+\tau}^i - c(q_{t+\tau}^i) \quad (\text{III.4})$$

¹⁰ $r(z)$ is concave such that $r'(z) > 0$ and $r''(z) < 0$. The diminishing returns reflect the increasing difficulty to recycle despite the higher expenses per tonne of scrap.

with δ as the discount factor, $c(q^i)$ the cost of production and $Q_t^Y = \sum_{i=1}^n q_t^i$ as the mining output in t . Aggregating with n firms and using (III.3), the FOC is :

$$p'_t(Q_t)Q_t^Y \left(1 + \theta Q_{t-1} \frac{\partial r(\hat{z}_t)}{\partial Q_t}\right) + np_t(Q_t) - c'(Q_t^Y) + \sum_{\tau=1}^{\infty} \delta^\tau p'_{t+\tau}(Q_{t+\tau})Q_{t+\tau}^Y \frac{\partial Q_{t+\tau}}{\partial Q_t} = 0 \quad (\text{III.5})$$

As in Sourisseau *et al.* (2018), we define $p(Q_t) = \frac{Ag^t}{Q_t^\alpha}$ where A , g^t and α capture the scale of demand, the rate of growth and the price elasticity of demand, respectively. Let the extraction cost function be convex such that $c(Q^{Y*}) = c\frac{Q_t^{Y^2}}{2}$. We consider that firms might likely face a depletion of high-quality ore deposits in the medium and longer term perspectives. In other words, we assume that the extraction technology exhibits decreasing returns to scale.

At steady state, the optimal mining output yields ¹¹ :

$$Q^{Y*} = \frac{Q^*(np(Q^*))}{\alpha p(Q^*) \left(cQ^* + \sum_{\tau=1}^{\infty} \delta^\tau e_\tau - \frac{\alpha\theta}{kg}\right)} \quad (\text{III.6})$$

where e_τ captures the marginal productivity of recycling. Thus, integrating the optimal output of the mining firms into (III.3), yields the following optimal secondary supply at steady state :

$$S^* = \theta Q^* \left(1 - \frac{(Q^*)^\alpha}{kAg}\right) \quad (\text{III.7})$$

Hence, the equilibrium price is as follows : $p^* = \frac{Ag}{(Q^{Y*} + S^*)^\alpha}$.

Like it has been showed in Sourisseau *et al.* (2018), recycling lowers mining output and pushes the price down, depending on the value of θ, k, g, n and c .

3.3 Social welfare

The literature concerning a recycling-mining competition framework barely considered the gap of environmental externalities from both activities, while regarding environmental damages related to mining activities and the potential role of re-

¹¹For further details see Appendix III.A

cycling in addressing this issue, such a consideration is at stake. Social welfare analysis has only been studied in regard to the effect of recycling on the mining market power, but the second market distortion related to mining pollution might have a significant impact on welfare. Without referring to such externalities, welfare can be illustrated through a standard Stackelberg leader(s)/follower graph. We distinguish the Consumer Surplus corresponding to the blue area from the Producer Surplus in yellow (Figure III.1). Within the latter, $\ll p^*hO \gg$ is the profit of the secondary sector and $\ll hE^*dg \gg$ is the mining profit ¹².

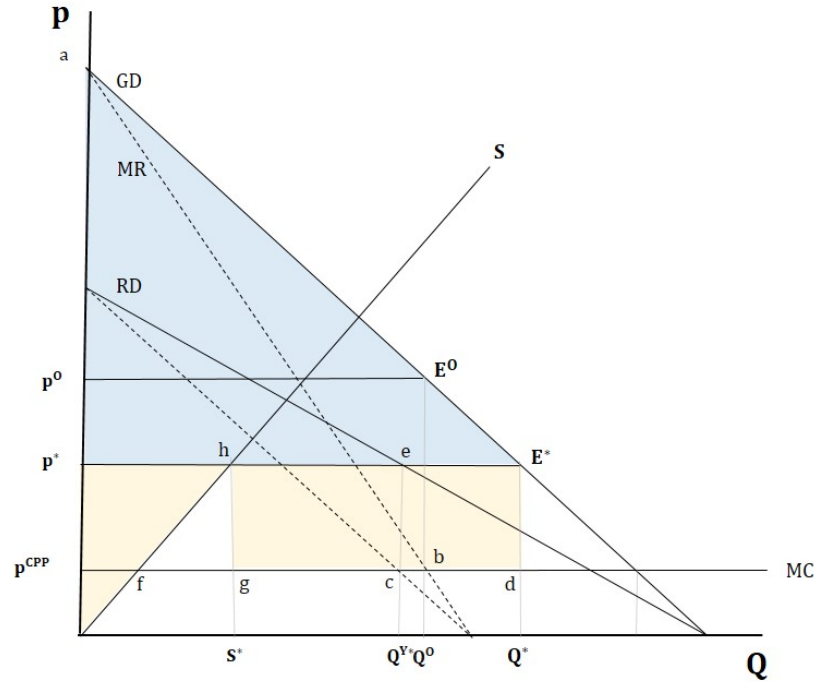


FIGURE III.1 – Social Welfare with the existence of recycling and a mining oligopoly

Considering the net damages caused by mining activity (*i.e.* the total pollution reduced by the environmental externalities from recycling) results in the total variation of SW shown in Figure III.2. The green areas of $\ll E^O E^Y db \gg$, $\ll ijD(Q^O)D(Q^{Y*}) \gg$ and $\ll Op^{CPP}f \gg$ are the social welfare gains. The secondary

¹²To make the graph more readable, we consider linearity in the Global and Residual Demands (GD and RD) as well as the Marginal Revenue (MR) and the Marginal Cost (MC). Note that this graph (as well as the following) is not at scale.

supply pushes the total quantity up to Q^* which implies a decrease of the price from p^O , the price level without recycling, to p^* , the new equilibrium price. This analysis stands as well with a monopoly as with an oligopoly. The difference lies in the value of Q^{Y*} , which results here from a Cournot competition between n firms. The welfare loss is illustrated with the red area $\ll hgf \gg$, corresponding to the difference of marginal cost between the mining firms and recyclers. Therefore, an inefficient production of materials occurs. In his study, Grant (1999) disregarded environmental externalities and, based on data from the Alcoa case, estimated that recycling was welfare decreasing, since $\ll$ secondary producers were recycling too intensively when virgin price exceeded their marginal cost $\gg$. In other words, the negative effect caused by the higher marginal cost to produce a recycled material was not offset by the potential decrease of the price due to recycling.

In addition, through Figure III.2 we highlight the importance of correctly assessing the environmental externalities from mining, since it might (more than) offset the loss of welfare due to the higher marginal cost of recycling. It is worth noticing differences between metals (*e.g.* aluminium, copper, iron ore, zinc) and strategic metals (*e.g.* rare earth elements, lithium, cobalt). The former exhibits (relative) high recycling rates, the mineral deposits are well identified as well as the related environmental externalities. Thus, welfare analysis can be conducted although data might not be easily accessible. Conversely, the recycling process of strategic metals is not all set and technology has still to be improved. In addition, extracting such materials might generate more pollution and artisanal mining frequently occurs. Thus, information and data either do not exist or turn out to be too much sensitive such as, for instance, the rare earth elements in China and cobalt in Republic Democratic of the Congo. Consequently, while improving recycling of these materials are of strong interest to policy makers, analysis on welfare seem to be rather difficult to estimate.

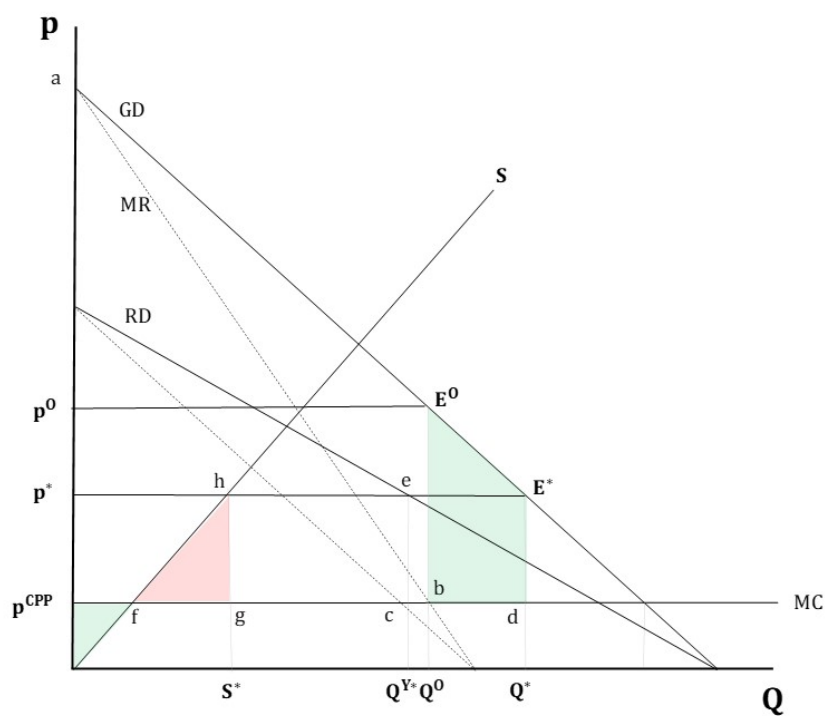
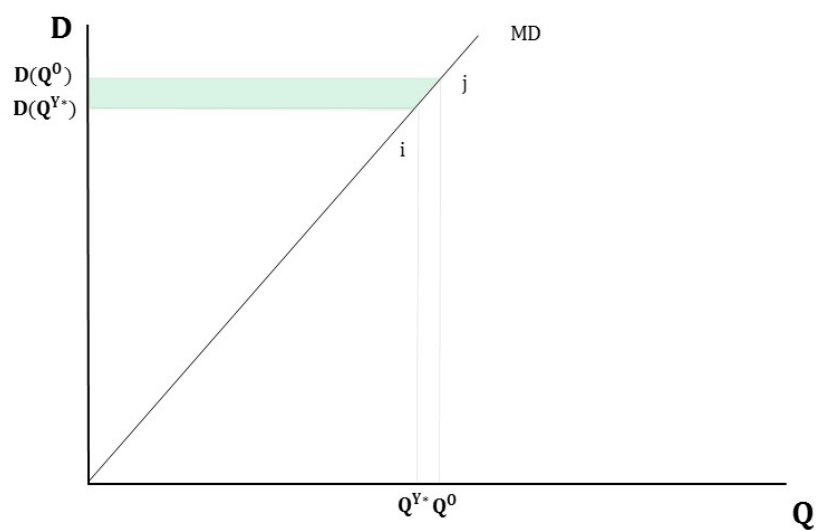


FIGURE III.2 – Variation of the social welfare with recycling and environmental externalities

Let social welfare $SW = CS + \Pi^Y + \Pi^S - D(E)$ be the unweighted sum of the aggregate consumer surplus (CS) and the aggregate producer surplus (Ritz, 2016) in which we have the mining profit (Π^Y) and profit of recyclers (Π^S). This social surplus is hampered by the environmental damage caused by mining ($D(E)$)¹³. We define the mining output as $Q_t^Y = \sum_{i=1}^n q_t^i$, with n being the number of mining firms, and assume an aggregated level of externalities as $E(Q_t^Y)$. For convenience, we have $D(E_t) = E(Q_t^Y)$, and the social welfare in t becomes :

$$SW(Q_t^Y; S_t) = \underbrace{\Pi^Y(Q_t^Y)}_{(i)} + \underbrace{\Pi^S(S_t)}_{(ii)} + \underbrace{CS(Q_t)}_{(ii)} - \underbrace{E(Q_t^Y)}_{(iii)} \quad (\text{III.8})$$

In the previous literature, to allow $SW|_{S_t>0} > SW|_{S_t=0}$, two conditions had to be met. The value of the secondary profit had to counterbalance the potential loss of the mining profit (i), and the total output had to increase in order to lower the price for the benefit of consumers (ii). Here, we show that to assess the effect of recycling on welfare, environmental externalities related to the expected lower mining output in the supply of materials, must be considered (iii).

With our values of Q^{Y*} , S^* , and p^* , and assuming that the consumer surplus is $CS(Q^*) = \frac{(Q^*)^2}{2}$, the social welfare at steady state becomes :

$$\begin{aligned} SW^*(Q^{Y*}; S^*) = & \frac{(Q^*)^2}{2} + \underbrace{\frac{Ag}{(Q^*)^\alpha}}_{\text{Price}} \times \underbrace{\left[Q^{Y*} + \theta Q^* \left(1 - \frac{(Q^*)^\alpha}{kAg} \right) \right]}_{\text{Total output}} \\ & - \underbrace{\left[c'(Q^{Y*})Q^{Y*} + z^*\theta Q^* \left(1 - \frac{(Q^*)^\alpha}{kAg} \right) \right]}_{\text{Total cost}} \\ & - \underbrace{E(Q^{Y*})}_{\text{Ext. effect}} \end{aligned} \quad (\text{III.9})$$

Thus, the value of SW^* depends significantly on the θ and k parameters. They determine the magnitude of the secondary supply and the resource productivity

¹³For convenience, we do not consider green R&D investments that would help the mining sector decrease pollution.

over time and, therefore, to what extent the mining output might decrease. The effect can be stressed (or restrained) with the degree of competition embodied by the number of mining firms n , the marginal cost of extraction c , and the growth rate of demand.

For instance, Table III.1 provides values of social welfare regarding different set of recycling parameters, such that :

- *Case 1* : Absence of recycling : either θ or k equals 0 and we have $SW^*|_{S^*=0} = SW^*|_{Q^{Y^*}=Q^*}$.
- *Case 2* : Low level of secondary supply with $\theta = 0.1$ and $k = 2$. This case corresponds to a recycling rate of 17 per cent,¹⁴ but less than 2 per cent of materials are provided by recyclers.
- *Case 3* : Important level of secondary supply with $\theta = 0.9$ and $k = 20$. The corresponding recycling rate is 89 per cent and 80 per cent of the materials are provided by recyclers.

With the assumption of a convex cost, more inputs such as energy and water would be required to produce an additional quantity of output. Consequently, more damages are expected. Let $E(Q^{Y^*}) = \gamma \frac{Q^{Y^*2}}{2}$ be a convex damage function where γ is the pollution per unit of mining output net from the environmental externalities of recycling. It includes those from the downstream industry in which the primary and secondary production processes differ (*e.g.* the iron and steel industry). In addition to use $\alpha = 0.25$ (Fischer, 2001) and $\delta = 0.95$ (OECD, 2001), we set up numerical values as follows¹⁵ : $n = 4$, $A = 1$ and $c = 0.2$.

¹⁴Note that this rate refers to the proportion of materials that become waste, are collected and are then, transformed into recycled materials.

¹⁵Several tests of sensitivity to variations of n , c and A have been conducted. Some results are provided in Appendix III.B.

TABLE III.1 – The effect of recycling on welfare with/without environmental externalities

	Case 1	Case 2	Case 3
<i>Consumer Surplus</i>	28.4	29.3	374
Mining output	7.5	7.5	5.5
Secondary output	0	0.1	21.8
Price	0.6	0.6	0.4
<i>Total Revenue</i>	4.5	4.6	12
Mining cost	17.1	17	9.2
Recycling cost	0	0.01	2.4
<i>Total Cost</i>	17.1	17.01	11.6
$SW^* _{\gamma=0}$	15.8	16.89	374.4
<i>External effect with $\gamma = 0.1$</i>	1.5	1.4	1.1
$SW^* _{\gamma=0.1}$	14.3	14.5	373.3

Regarding these parameter sets, the existence of a secondary sector seems to be welfare improving when its share in the material supply rises (*i.e.* $SW^*|_{\gamma=0}^{Case\ 2} < SW^*|_{\gamma=0}^{Case\ 3}$). The profit of the mining firms is offset by the profit of recyclers and we observe a greater consumer surplus. Here, we do not observe any sign that recycling could lead to a decreasing welfare. This latter situation occurs when recyclers do not counterbalance the decrease of the mining output enough, leading to a greater price. In this case, the market power is expected to rise since the mining firms strategically restrain their output in order to limit the future competition (see *e.g.* Gaskins (1974), Martin (1982)). However, such strategy is more and more difficult to set up with a more competitive mining sector and a better share of the secondary supply. As expected, social welfare becomes lower when environmental externalities are considered. Furthermore, as the share of the secondary supply rises to the detriment of mining, the external effect decreases and the difference between the SW values gets smaller such that :

$$SW^*|_{\gamma=0}^{Case\ 1} - SW^*|_{\gamma=0.1}^{Case\ 1} > SW^*|_{\gamma=0}^{Case\ 2} - SW^*|_{\gamma=0.1}^{Case\ 2} > SW^*|_{\gamma=0}^{Case\ 3} - SW^*|_{\gamma=0.1}^{Case\ 3} \quad (III.10)$$

Here, we highlight that social welfare might be maximised when recycling runs in a closed loop (*i.e.* without depreciation in the recycling process or loss in the collect sytem), since recyclers are in a competitive market structure and generate fewer environmental externalities compared to mining. Nevertheless, laws of thermodynamics make mining extraction necessary to fill the gap created by material leaks. Thus, the closed-loop scenario leading to a competitive price appears to be fictive, so, the social optimum is the second-best choice. Differences exist according to the materials that are considered. For instance, since recycling is much less efficient for strategic metals than for base metals, mining extraction is more necessary ; hence, the second-best is more complicated to reach.

4 Public policies

Regarding the market distortions in the recycling-mining competition framework and the ability of recycling to address both environmental externalities and market power issues, in this section we introduce a tax on the mining firms and a subsidy on recycling in our partial equilibrium analysis. They are the most likely to be set-up and even though they might differ in their initial purpose to deal with market distortions, they both affect the supply of materials in terms of market share, pollution and welfare.

4.1 A pollution-based tax

We still assume net environmental externalities from the mining activity and the downstream industry but we consider that the potential tax is only applied to the mining firms. Therefore, setting-up a tax ψ directly affects the cost of mining such that :

$$c(Q_t^Y) = \frac{(Q_t^Y)^2}{2}(c + \psi\rho) \quad (\text{III.11})$$

where ρ captures the environmental externalities per tonne of ore extracted. For instance, if a half tonne of CO₂ is relased during the extraction process (*i.e.* $\rho =$

0.5) and a US\$ 10 carbon tax is levied by the regulator (*i.e.* $\psi = 10$), the mining firm will be charged of US\$ 5 per additional tonne of ore extracted ¹⁶.

At steady state, with (III.6) and (III.11), we have :

$$Q^{Y*} = \frac{Q^*(np(Q^*))}{\alpha p(Q^*) \left((c + \phi\rho)Q^* + \sum_{\tau=1}^{\infty} \delta^\tau e_\tau - \frac{\alpha\theta}{kg} \right)} \quad (\text{III.12})$$

As is well known in the standard literature ¹⁷, the effect of environmental taxation on an oligopoly with a symmetric cost structure and in the absence of strategy is such that $\frac{\partial Q^{Y*}}{\partial \psi} < 0$ and $\frac{\partial E(Q^{Y*})}{\partial \psi} < 0$.

Determining the overall effect of such a tax on the materials supply and welfare, requires considering the question of the indirect effect on the secondary supply. More precisely, it requires observing whether, and to what extent, recyclers can offset the decrease of the mining output.

Breaking down the effect of the tax on the secondary sector yields :

$$\frac{\partial S_t}{\partial \psi} = \bar{q} \underbrace{\frac{\partial r(z_t)}{\partial Q_t}}_{<0} \times \underbrace{\frac{\partial Q_t}{\partial Q_t^Y}}_{>0} \times \underbrace{\frac{\partial Q_t^Y}{\partial \psi}}_{<0} d\psi \quad (\text{III.13})$$

Here, we highlight how setting up a tax seems to be positive for recyclers. A higher price encourages them to raise their expenses per unit of scrap and provides a greater recycling rate. This is what we called « the price effect » in the previous chapter. However, a decrease of the mining output also leads in the longer term to a lower stock of scrap as long as the recycling loop is not fully closed (*i.e.* the stock effect). As such, recyclers are encouraged to raise their expenses, leading to a greater recycling rate, but their relative supply might fall with the decreasing stock of scrap in the longer term.

¹⁶In reality, the mining activity is responsible for much more environmental damage than only the emissions of CO₂. Pollutants such as NO_x and SO_x are released, numerous chemical substances are used and hazardous waste might be generated by the extraction process. However, internalising the related flow and stock pollutants through a tax (or any other policy) is rather complex since, as we mentioned previously, their assessment is difficult and varies a lot among materials and countries where ore deposits are located.

¹⁷For details, see Requate (2005)

In this context, a pollution-based tax might help address the issue of environmental externalities in the supply of materials, but the effect on welfare appears to be ambiguous. More specifically, it recalls the importance of considering the values of θ and k . It defines the extent to which recyclers work within a full circular model and thus, how the market price will be affected since the greater is the relative secondary supply, the lower is the price. For instance, a high level of θ might counterbalance a decrease in the mining output due to the taxation, at least temporarily. Consequently, it will limit the rise of the price. Conversely, recyclers might be more dependent on the level of the stock of scrap and would be unable to counterbalance a decrease in the mining output, if θ is low and/or the recycling process is inefficient.

Graphically, Figure III.3 shows a static view of the effects of an environmental tax on welfare. While the expected gain is a decrease in the environmental damage (area $\ll D(Q^{Y*})ihD(Q^{Y**}) \gg$), a loss arises with the rising marginal cost of both the mining firms and recyclers. The $\ll abcg \gg$ represents the new inefficient supply coming from recyclers, and the area $\ll gcdE^{**}E^*ef \gg$ is the standard effect related to the switch from the private equilibrium E^* to the social equilibrium E^{**} . It recalls the importance to correctly assess the environmental damages caused by mining activity on air, water, and land.

Considering leaks in the recycling process, ore extraction is required to feed what is not $\ll$ secondarily supplied $\gg$ in the market. Thus, as mentioned previously, the materials supply cannot become fully competitive, and the optimal pollution-based tax turns out to be a second-best. It results from maximising social welfare such that $\frac{\partial SW^*(Q^{Y*}(\psi))}{\partial \psi} = 0$. Let ψ^* be the optimal tax. Its level internalises all the environmental externalities of mining and might strongly depend on the ability of recyclers to supply materials by themselves. Therefore, such a policy should be set up at a national level, since the secondary sector varies according to materials and countries. In this case, it would take the form of a border-tax based on the pollution content of ore imports, expressed, for instance, in terms of a CO₂ equivalent.

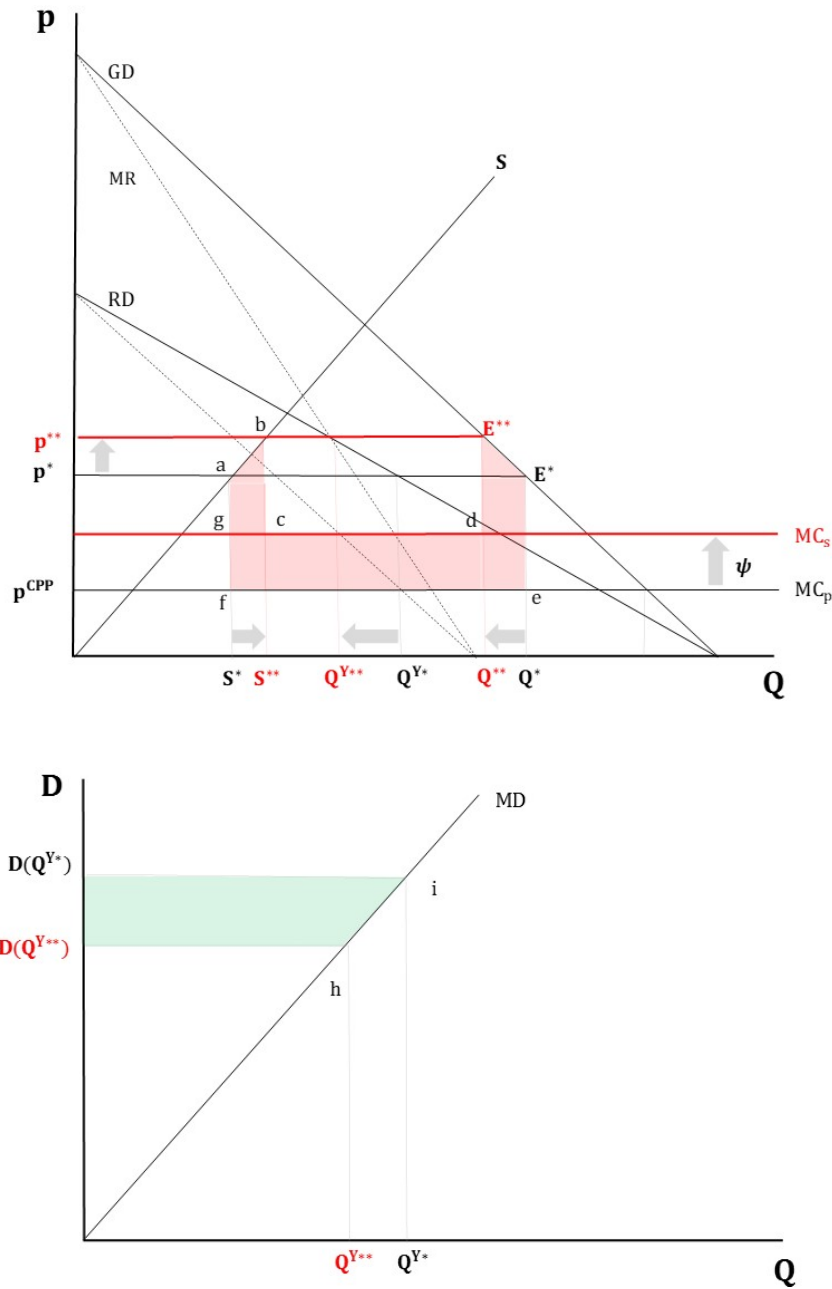


FIGURE III.3 – Effect of a pollution-based tax on welfare

4.2 A recycling subsidy

As the other standard policy likely to affect the materials supply, a regulator can grant a subsidy to recyclers ¹⁸. Thus, the recycling function takes the following

¹⁸Since we focus on a partial equilibrium model, we do not consider who is in charge of granting such a subsidy.

functional form :

$$r(z_t) = 1 - e^{kz_t(1+\phi)} \quad (\text{III.14})$$

with $0 \leq \phi < 1$ being the share of the subsidy in the unit cost of recycling. For instance, we can consider that the collect system might be partially or totally assumed by a local authority. In this case, it would be weighted by the share of the collect in the unit cost.

With $r'(z) = \frac{1-\phi}{p_t}$ and (III.14), the marginal cost of recycling that verifies $\Pi_t^{S'} = 0$ is as follows :

$$k(1+\phi)e^{-kz(1+\phi)} = \frac{1-\phi}{p_t}$$

$$\hat{z}_t = \frac{\ln kp_t(1+\phi) - \ln(1-\phi)}{k(1+\phi)}$$

This yields the following optimal level of recycling in t :

$$r(\hat{z}_t) = 1 - \left(\frac{(1-\phi)}{kp_t(1+\phi)} \right) \quad (\text{III.15})$$

A situation in which $\phi = 0$ refers to the optimal level of recycling expressed in (III.2). Likewise, $\phi < 1$ since $\lim_{z_t \rightarrow +\infty} r(z_t) = 1$. With $\frac{\partial r(\hat{z}_t)}{\partial \phi} > 0$, we observe a positive effect of an increase in ϕ on recycling. Therefore, it yields $\frac{\partial S_t}{\partial \phi} > 0$, and the optimal secondary supply becomes at steady state :

$$S^* = \theta Q^* - \frac{\theta Q^*(1-\phi)}{kp_t(1+\phi)} \quad (\text{III.16})$$

With a subsidy, the regulator aims at making the supply of materials more competitive. This policy decreases the private cost of recycling and since the gap with the cost of extraction is reduced, recyclers become more competitive. Consequently, a higher share of the secondary supply is expected. As illustrated on Figure III.4, it implies a shift downward of the curve S according to the value of ϕ , as well as a shift downward of the residual demand.

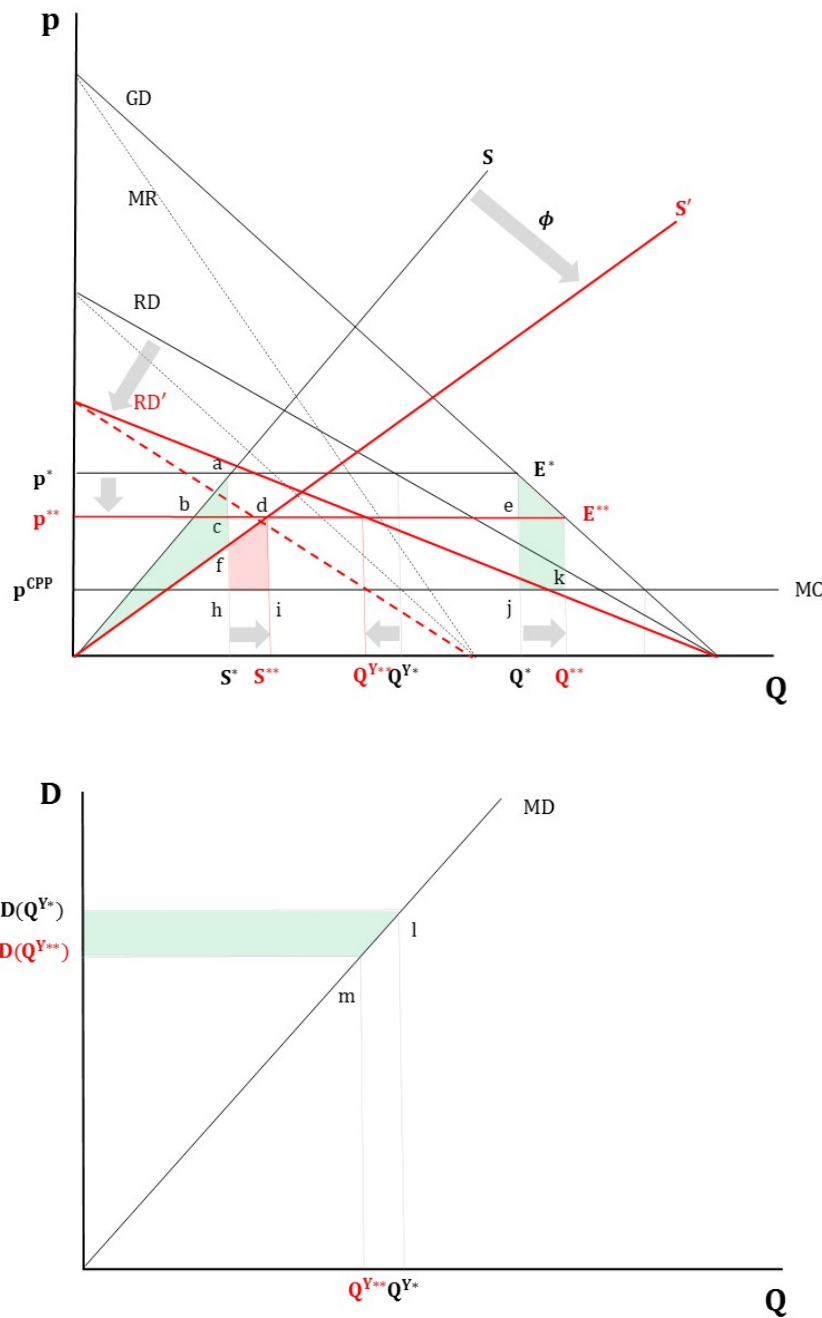


FIGURE III.4 – Effect of a recycling-related subsidy on welfare

In terms of welfare, we first observe a positive effect on the consumer surplus thanks to the induced lower price (areas $\ll abc \gg$ and $\ll E^*eE^{**} \gg$). A second positive effect is captured by the increase in the secondary supply (area $\ll obcf \gg$). We also observe a welfare gain with area $\ll eE^{**}kj \gg$, representing a transfer of surplus from the mining firms to consumers, through the decrease of the price. As a

consequence of the switch of the supply from the mining firms to recyclers, a lower environmental damage is expected, as illustrated by area $\ll D(Q^{Y*})lmD(Q^{Y**}) \gg$. However, inefficiency related to the difference between the cost of recycling and the cost of extraction remains (area $\ll f di h \gg$). In addition, since we observe a lower mining output going along with the decreasing price, it seems that by encouraging recyclers with a subsidy the regulator reduces the mining firms' profit (assuming a constant marginal cost of extraction).

As for the pollution-based tax, the (second-best) optimal level of the subsidy is such that $\frac{\partial SW^*(r(z^*; \phi))}{\partial \phi} = 0$. In addition, like De Beir *et al.* (2007) demonstrated in their paper, we cannot exclude to phase such policy out along an improvement of the relative secondary supply of materials, but only if this improvement results from a more efficient technology of recycling. Otherwise, phasing out such a cost-based subsidy that we have assumed here, would reduce the competitiveness of recyclers and thus, their ability to compete the oligopoly and decrease the mining firms' pollution.

4.3 Tax on mining pollution or subsidy on waste recycling ?

In sum, the tax and the subsidy differ in their initial purpose to deal with market distortions. While the former aims to directly address the environmental externalities, the latter focuses on making the supply of materials more competitive and thus, leads to a decrease of the mining market power. Therefore, the extent to which both policies affect market shares, the environmental externalities of the supply of materials and thus, social welfare, also differ. A brief comparative analysis is provided in Table III.2. By comparing these two policies it seems that a subsidy to recyclers addresses both issues related to the mining pollution and the market power, while the effect of the tax on the latter issue is more ambiguous.

More specifically, a subsidy might be of strong interest for strategic materials since recycling is currently very low. Also, unlike base materials, the stock of scrap for strategic materials is not very significant and prevents recyclers from reaching economies of scale. Therefore, a tax on mining could strengthened this constraint

for recyclers. For base materials, the related question regarding whether a regulator should tax mining extraction or subsidise recycling, seems to strongly depend on the magnitude of the secondary sector and thus, the initial values of θ and k . As such, it is worth analysing each of these policies for a defined material and according to the various situations of recycling that occur in different countries : the iron and steel industry within China, Japan, the US and Germany.

TABLE III.2 – Comparative analysis

	Tax	Subsidy
Environmental externalities	(+++) ¹ Pollution directly decreases with the tax.	(++) Pollution is indirectly reduced : the higher is the subsidy, the more dominant recyclers will be and thus, pollution will be significantly reduced.
Effect on competition	(+) In the short term, the greater induced price encourages recyclers to rise expenses and thus, competition is improved with a potential increase of the secondary supply. In the longer term, the stock of waste is more binding because of the lower mining output. Thus, the effect on the market shares is limited.	(+++) Recyclers' market share are directly improved, leading to a more competitive supply of materials.
Implementation of the policy	(+) Countries with significant mining sector do not have interest to set-up such a policy. Countries insufficiently endowed with materials might adopt border-tax based on a pollution content of materials imported.	(++) Implementation can take various forms and be set-up at local or national level. The limit lies in the funding of such a policy.

¹(+);(++);(++) : *relevance of the policy*

5 Application

5.1 The iron and steel industry

Except for very high-added value products used in, for instance, the aircraft and energy sectors where steel must be pure ¹⁹ it is technically equivalent to use scrap rather than iron ore as main input to produce crude steel, although a distinction holds between the primary process based on iron ore and coking coal (hereafter the BOF process for « Basic Oxygen Furnace »), and the secondary process, based on recycled steel scrap (hereafter the EAF process for « Electric Arc Furnace »). For over 20 years, three mining firms have held approximately 65 per cent of the market shares in the iron ore seaborne market. The so-called « Big 3 » - or more recently « Big 4 » - and other marginal mining firms compete with recyclers to provide inputs to steelmakers. As illustrated in Figure III.5, the market share of recyclers differs greatly between the main steelmaking countries (see Appendix III.C).

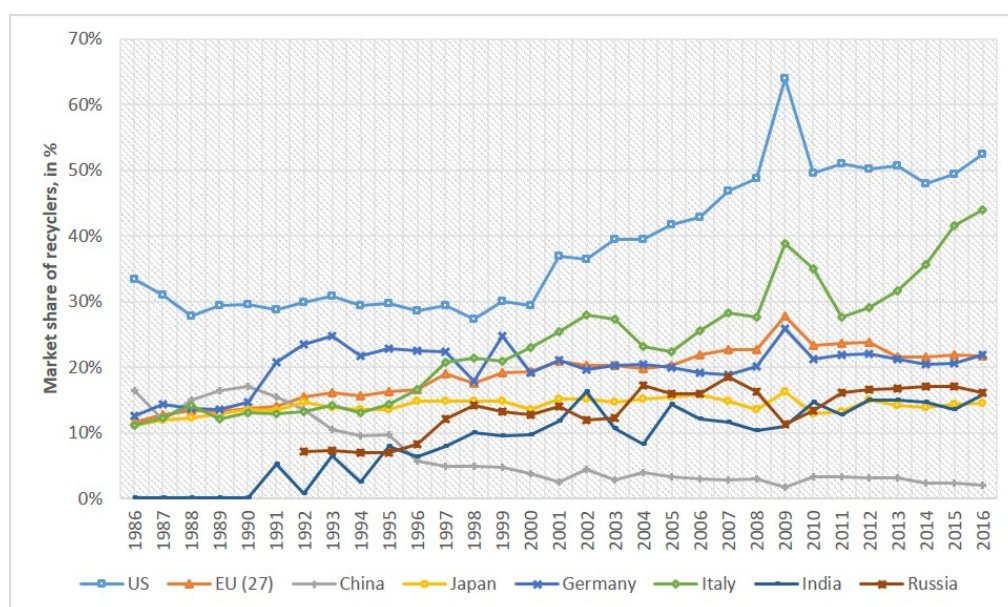


FIGURE III.5 – Market share of recyclers in the supply of input to steelmakers

¹⁹It represents 5 to 15 % of the steel produced (source : interviews conducted with experts of the steel industry)

Thus, the better that secondary supply is, the lower the environmental footprint of the materials supply will be. Upstream at a global scale, any input provided by recyclers avoids additional environmental externalities that would result from ore extraction. Downstream at a more local scale, it allows public authorities to dispose of waste that would either go to landfills or be dumped into the nature at home or abroad when such a flow of waste is exported in countries where environmental regulations are less stringent. Considering the fact that the secondary supply only provides input to EAF and that the primary supply only provides input to BOF ²⁰, we are able to compute the aggregated environmental externalities in terms of the CO₂ emissions ²¹, of each country throughout 1986-2016 (see Appendix III.D). For instance, recycling allows the European and Chinese steelmaking industries to avoid an important amount of CO₂ in absolute terms (Figure III.8). However, it turns out that this CO₂ avoided is mainly due to the magnitude of their steel production, since their CO₂ content appears to be rather high, unlike in the US or Italy (Figure III.9). In their research, Hasanbeigi *et al.* (2016) estimated that applying the share of EAF production in China, to the US steelmaking structure, would lead to a 56 per cent increase in the CO₂ intensity and a 19 per cent rise in Germany.

While improving the energy efficiency of the BOF process would help a steel-making industry decrease its CO₂ emission intensity ²², a switch from the primary to the secondary sector also appears to be at stake because it would also address

²⁰We leave aside the little share of scrap that can be used in the BOF process, since we consider that this share might be home or new scrap instead of old scrap coming from recyclers.

²¹Other pollutants and damages from mining activity and steelmaking, as well as benefits from recycling instead of landfilling or waste incineration, are not considered in this chapter. Although such a consideration would have strengthened the positive effects of recycling compared to mining, assessing all of these environmental externalities, in particular those related to mining, is complicated and thus, their internalisation through public policies rather complex. Therefore, in this application we only focus on the CO₂ emissions and a potential related carbon tax.

²²As the largest producer of steel, the pressure on China to reduce CO₂ emissions increased greatly following the adaptation of the Kyoto Protocol and more recently with the Paris Climate Agreement. Between 1980 and 2013, steelmakers rose CO₂ emissions with an average annual growth rate of 8 per cent a year (Xu and Lin, 2016). As a consequence, numerous papers sought drivers and unsurprisingly shed light on the low energy efficiency of the Chinese steelmaking process which was called upon to face rapid urbanisation and industrialisation (Yi-Ming *et al.* (2007); Lin and Wang (2011)).

the scarcity issue (at least partially) and help countries rely less on raw material imports.

5.2 Data

In order to simulate our model with several policies, we use data from four countries representing the various market share of recyclers in the supply of materials, and most of the steel produced, such that in 2016 : China (50%), Japan (6.5%), US (5%) and Germany (2.6%). They differ in the following aspects :

- *The share of short lifespan products* : As shown in the model, recyclers are constrained by a stock of scrap resulting from previous production (*i.e.* θQ_{t-1}). By considering all steel products, θ would reflect the efficiency of the collect system (*i.e.* the proportion of scrap available for recycling). However, assessing the quantities of scrap from the construction sector is rather complex. Due to an average lifetime of approximately 60 years, gathering data represents a significant issue.

Thus, for convenience, θ captures the share of short lifespan products. Here, we consider that the structure of end-of-life products differs among countries. The availability of scrap increases with economic maturity, since the share of steel devoted to construction decreases in favour of steel contained in transports, industrial goods, and household appliances. Since the construction sector represents 31 per cent to 57 per cent in the consumption of steel, it gives a value of θ that ranges from 0.43 to 0.69 (see Appendix III.E). In South-East Asia, the share of construction can even reach over 80 per cent²³.

- *The recycling rate* : To reflect differences in the ability of recycling in these countries, we compute the average recycling rate over 2006-2016 for each

²³Source : The Southeast Asia Iron and Steel Institute.

Available at, <http://www.seaisi.org/News/5250/Iron+and+Steel+Industry+in+ASEAN:+Characteristics+and+Supply+Capability>

country such that $r(\hat{z}_t)^i = \frac{S_t^i}{\bar{q}_t^i}$. Since we aim at assessing the stock of scrap for each year, we use the products lifetime, their share in consumption of steel, and apply these ratio to our data from 1986 to 2003. It provides an average recycling rate of 72 per cent in China, 41 per cent in Japan, 70 per cent in the US and 43 per cent in Germany (see Appendix III.F). To run the model and capture differences in ability of recycling, we adjust the value of k that fits with the recycling rate of each country, as shown in Table III.3.

Considering that recyclers are also in charge of collecting scrap lead us to use an extensive definition of recycling ²⁴. It implies two types of leaks (or inefficiencies) that occur in the collect system and/or in the recycling process itself. Thus, differences in recycling rates reflect the ability of countries to collect and recycle steel scrap from short lifespan products.

- *The iron and steel industry's CO₂ emissions intensity* : CO₂ emission intensity differs among countries, since they do not all have the same steelmaking structure (see Figure III.9). We use the average steel intensity over 2006-2016, which ranges from 0.678 tonne of CO₂ per tonne of steel in the US to 1.322 tons of CO₂ in China.
- *The growth of demand* : In our sample, Japan, the US, and Germany represent industrialised countries within which the demand for steel products has been constant for several years now. Conversely, as an emerging country, China has kept increasing its steel production (+14% on average per year over 2000-2016). Unlike in Japan, the US, and Germany, the consumption of materials is still very high in China. It gave on average over 2006-2016 a growth rate of almost nil for Japan, the US, and Germany, while the rate rose to approximately 8.5 per cent in China.

Moreover, to better reflect the role of public policies focused on the supply of materials, we assume a constant and common scale of demand among countries

²⁴A restrictive definition of recycling consists of only focusing on the amount of scrap available for recyclers with respect to the secondary materials produced. Likely, this would yield higher recycling rates since leaks in collecting scrap are not considered.

in which, for convenience, $A = 1$. The elasticity price of demand is also supposed to be constant in the model with $\alpha = 0.25$ (Fischer, 2001). Then, differences in demand are only illustrated by the growth rate. We also assume a discount factor of 5 per cent (OECD, 2001).

Regarding the mining firms, in addition to the Big 4 composed of Vale (Brazil), Rio Tinto (Australia), BHP Billiton (Australia), and Fortescue Metals Group (Australia), a few other firms might provide inputs to steelmakers, including Anglo-American operating mostly in South Africa, Cliff Natural Resources Cliffs operating in the US, and Mount Gibson having assets in Australia. Based on the United-Nations Comtrade database, we have narrowed the exporting countries of iron ore to China, Japan, US and Germany. On average, over the period 2006-2016, 90 per cent of imports came from Australia, Brazil, Canada, India, and South-Africa. Considering that a part of iron ore might be produced at home (*e.g.* in China and the US), that some of the assets are owned by the same firms, and given the variations among countries and the lack of more accurate information, we use an interval of four to nine firms operating either as home producers or iron ore exporters in the countries.

While in theory, as explained in the model with an infinite horizon, the cost of extraction is expected to be convex, here we consider that in short and medium term, technology offsets the decrease of the ore grade. Thus, we can assume a common and constant cost of extraction to be $c = 0.3$. To reflect the mining rent, we also ensure that this value of c is lower than the estimated price at steady state.

Additionally, Norgate and Haque (2010) estimated that the CO₂ intensity of iron ore mining is 0.012 tons of CO₂ per tonne of output.

Table III.3 summarizes the values of parameters used in the model.

TABLE III.3 – Values of parameters

		China	Japan	US	Germany	Source
Average market share over 2006-2016 (St. Dev.)		44.3% (0.05)	7.4% (0.01)	5.8% (0.01)	2.9% (0.004)	
Short lifespan products	θ	0.43	0.63	0.60	0.69	Appendix III.E
Recycling rate	r^*	70.7%	41.1%	69.8%	42.7%	Appendix III.F
(related level of technology ¹)	k	(10.7)	(5.35)	(10.38)	(5.5)	Adjusted with the model
CO ₂ int. of steelmaking ² (in tons)	γ	1.322	1.134	0.678	1.046	Appendix III.D
Growth rate of demand	g	1.085	0.999	0.993	1	World Steel Association
Price elasticity	α			0.25		Fischer (2001)
Discount factor (5%)	δ			0.95		OECD (2001)
Number of mining firms	n			4-9		UN Comtrade
CO ₂ int. of mining ² (in tons)	ρ			0.012		Norgate and Haque (2010)

¹ : The values of k correspond to a number of mining firms $n = 4$, but are adjusted when simulations are conducted with $n = 9$.

² : Expressed in tonne of CO₂ per tonne of output.

5.3 Results

As mentioned previously, the higher the share of the secondary supply is, the more the sector moves to a full-circular model and the better it is for welfare. Therefore, we aim at examining the effects of a pollution-based tax on mining and a subsidy on recycling on three indicators : the recycler's market share (MS), the environmental damage (CO_2) and social welfare (SW).

To do so, we consider a baseline scenario in which none of the policies were applied. Thus, variations of the three indicators have been estimated for each country according to the following policies :

- A pollution-based tax on the mining firms representing 10 per cent, 50 per cent, and 100 per cent of the cost of extraction, respectively. Estimations of the cost of iron ore mining indicated that the unit cost of most of the deposits ranges from US\$ 40 to US\$ 80 (ERI, 2014). As such, this would correspond to a global CO₂ price from US\$ 4 per tonne of CO₂ emitted as a lower value, to US\$ 80 as an upper value.

- A subsidy on recycling representing 5 per cent, 20 per cent, and 50 per cent of the marginal cost, respectively. In addition to dealing with the absence of empirical data, here we assume that the subsidy would not fully cover the cost of recycling.

Results are provided in Table III.4.

TABLE III.4 – Effects of a tax to mining and a subsidy to recycling on the supply of materials

Policy	China			Japan			US			Germany		
	(MS)	(CO ₂)	(SW)	(MS)	(CO ₂)	(SW)	(MS)	(CO ₂)	(SW)	(MS)	(CO ₂)	(SW)
Emission-based tax as a value per tonne of CO ₂ emitted												
US\$ 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-1.2%	-	-	-
US\$ 40	-	-2.5%	-4.7%	-	-2.8%	-4.8%	-	-2.6%	-4.8%	-	-2.8%	-4.8%
US\$ 80	-	-4.9%	-9.2%	+1.7%	-5.3%	-9.1%	-	-5%	-9.2%	+1.6%	-5.3%	-9.2%
Subsidy to recycling as a share of the marginal cost												
5%	+3.9%	-1.8%	-	+13.6%	-4.8%	-	+4.1%	-3%	-	+12.8%	-5.4%	-
20%	+13.8%	-6.2%	-	+47.7%	-16.9%	-	+14.4%	-10.5%	-	+44.7%	-18.8%	-
50%	+25.5%	-12.5%	-1.3%	+95.4%	-33.6%	-	+29%	-21%	-	+89.4%	-37.5%	-

Here we show the average value for simulations with $n = 4$ and $n = 9$. $\ll - \gg$ means the variation is less than 1%.

The very few effects observed with a pollution-based tax are due to the low level of CO₂ emissions per tonne of iron ore extracted. The environmental externalities of mining are mostly observed in terms of land use, as well as water and ground pollution. A further work of assessing such externalities is necessary in order to find the way of internalising them. Thus, our results show that such a policy does not appear to be relevant to foster recycling instead of mining. Only a small change is observed for the market share of the secondary sector in Japan, with an increase of 1.7 per cent with a US\$ 80 tax. Regarding CO₂ emissions and welfare, we observe homogeneous effects. No matter their initial level of recycling, the countries face similar decrease of CO₂ emissions. The lower level of welfare results from the higher price caused by the CO₂ tax, since recyclers face a greater constraint of stock and then cannot offset the decrease of the mining output.

Unlike with the latter, a significant change in the supply of materials seems to be achieved with recycling subsidies. Even a slight subsidy of 5 per cent would

help the secondary sector gain market shares. Such a public policy could mostly be done through efforts in collecting scrap, and unsurprisingly, the results are more significant for the countries with a low initial recycling rate : Japan and Germany. In addition, to foster the market share of the secondary sector, giving subsidies to recyclers imply lowering the CO₂ emissions of the iron and steel industry. Again, this effect is more striking for countries with a relatively high CO₂ intensity in the steelmaking industry and for which such a policy appears to be very significant. Interestingly, these changes in the supply of materials are reached without a significant decrease of welfare because the induced lower mining profits are offset by profits for recyclers and lower CO₂ emissions.

6 Conclusion

This chapter is based on the fact that most of the literature studying interplays between mining and recycling does not pay attention to environmental externalities, but focused on the mining market power and the dynamics of resource depletion. Welfare analysis are only conducted through the view of a potential decrease of price due to the existence of a fringe of competitive recyclers. As some of the recycled material is produced at a marginal cost exceeding that of the mining sector, empirical work has shown that recycling can even be welfare decreasing. Such a situation can also arise by considering strategic behavior from mining firms. Herein we show how welfare analysis can be affected by considering the environmental externalities of the mining activity. One such consideration highlights the relevance of correctly assessing the mining pollution, which is not an easy task especially for strategic materials, and it also confirms the need for a greater secondary supply, since recycling might address both issues of market power and pollution. However, since leaks of materials prevent from attaining a closed-loop economy, the non-competitive mining industry will keep providing materials, and the social steady state equilibrium remains a second-best. Addressing both market distortions related to mining leads us to consider potential public policies that

might affect the terms of competition and thus, welfare. More specifically, while a subsidy on recycling and a pollution-based tax on mining differ in their initial purpose, they both affect the market shares of the materials supply, environmental damage, and welfare. To reflect the various instances of the competition between recycling and mining, we apply our model to the iron and steel industry framework. Our results demonstrate the very small effects of a CO₂ tax as compared to a subsidy granted to recyclers. Moreover, despite lowering CO₂ emissions, such a policy implies a decrease of mining output that cannot be offset by recyclers, since their constraint of stock becomes more stringent. Conversely, fostering the level of recycling through a subsidy allows the secondary sector to gain market shares, especially for countries with a lower initial level of recycling. The decrease in CO₂ emissions turns out to be more significant than with the tax and welfare remains constant. However, the question of how to finance such a policy remains, as does that regarding the ability of steelmakers to switch from EAF to BOF, since inertia in such a structural change in the industrial process is expected.

Annexes III

III.A Optimal mining output

Determining the optimal output with n mining firms and a recycling sector yields the following FOC :

$$p'_t(Q_t)Q_t^Y \left(1 + \theta_{Q_{t-1}} \frac{\partial r(\hat{z}_t)}{\partial Q_t}\right) + np_t(Q_t) - c'(Q_t^Y) + \sum_{\tau=1}^{\infty} \delta^\tau p'_{t+\tau}(Q_{t+\tau})Q_{t+\tau}^Y \frac{\partial Q_{t+\tau}}{\partial Q_t} = 0. \quad (\text{III.17})$$

With $p(Q_t) = \frac{Ag_t}{Q_t^\alpha}$ we have $p'_t(Q_t) = -\alpha \frac{p(Q_t)}{Q_t}$ and since we consider a convex cost function $c(Q^{Y*}) = c \frac{Q_t^{Y^2}}{2}$, it yields $c'(Q_t^Y) = cQ_t^Y$. Hence, it implies :

$$-\alpha \frac{p(Q_t)}{Q_t} Q_t^Y \left(1 + \theta_{Q_{t-1}} \frac{\partial r(\hat{z}_t)}{\partial Q_t}\right) + np_t(Q_t) - cQ_t^Y + \sum_{\tau=1}^{\infty} \delta^\tau p'_{t+\tau}(Q_{t+\tau})Q_{t+\tau}^Y \frac{\partial Q_{t+\tau}}{\partial Q_t} = 0. \quad (\text{III.18})$$

In addition, with $r(\hat{z}_t) = 1 - \frac{1}{kp(Q_t)}$, we obtain :

$$\frac{\partial r(\hat{z}_t)}{\partial Q_t} = -\frac{\alpha}{kQ_t p(Q_t)}. \quad (\text{III.19})$$

As in Sourisseau *et al.* (2018), we define $e_{t,\tau} = \frac{\partial Q_{t+\tau}}{\partial Q_t}$. At steady state, since $\hat{z}_t = z^*$, $Q_t^Y = Q^{Y*}$, $Q_t = Q^*$, $g = \frac{g^t}{g^{t-1}}$ and $e_{t,\tau} = e_\tau$, we have for $\tau \geq 1$:

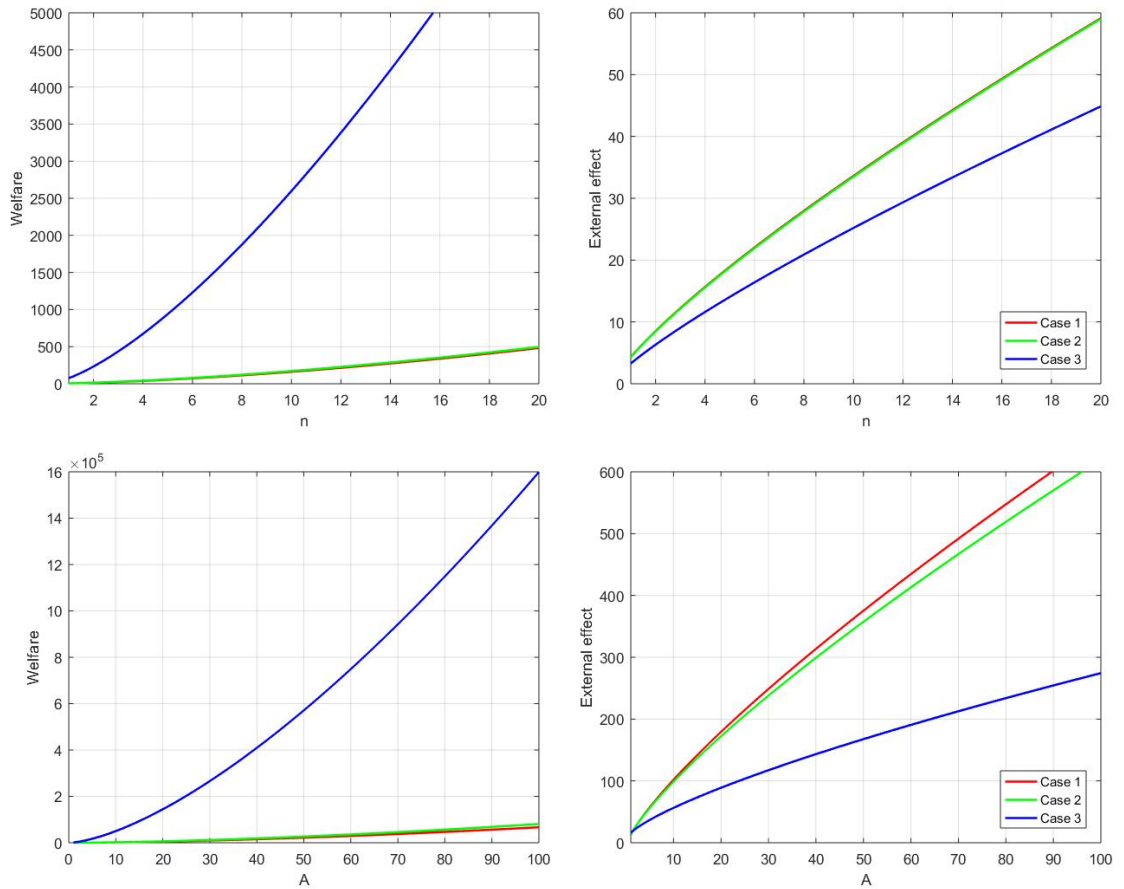
$$Q^{Y*} \left(c + \frac{\alpha p(Q^*)}{Q^*} \left(1 - \frac{\alpha \theta}{k g p(Q^*)} + \sum_{\tau=1}^{\infty} \delta^\tau e_\tau \right) \right) = np(Q^*). \quad (\text{III.20})$$

Hence, the optimal mining output is given by :

$$Q^{Y*} = \frac{Q^*(np(Q^*))}{\alpha p(Q^*) \left(cQ^* + \sum_{\tau=1}^{\infty} \delta^{\tau} e_{\tau} - \frac{\alpha \theta}{kg} \right)}. \quad (\text{III.21})$$

III.B Tests of sensitivity

By simulating variations of parameters n , A and c in our model we highlight how recycling improves welfare and allows lower environmental externalities. The red and green lines follow the same path since the case 2 embodies a very low secondary supply. The gap with the blue line represents variations that depend on the significance of the secondary sector (*i.e.* the values of θ and k). More specifically, in a context whereby the cost of extraction increases, we observe how recycling can offset welfare losses.



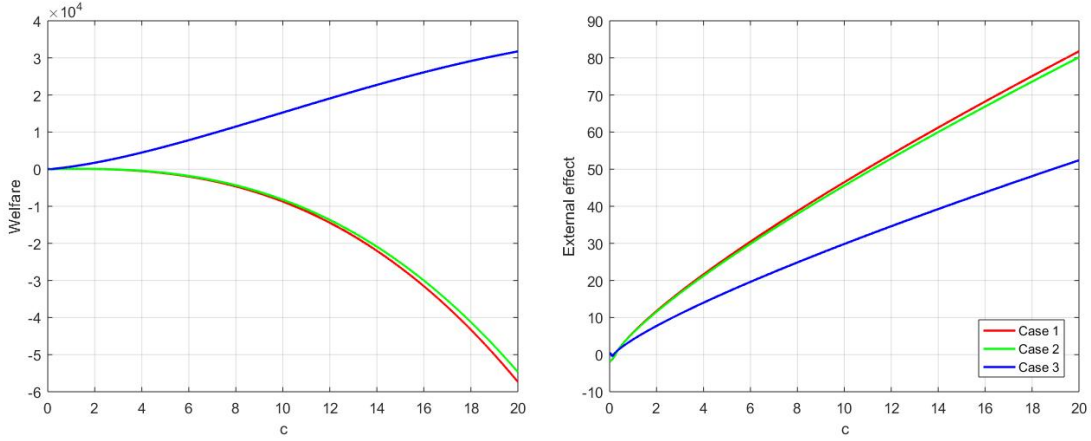


FIGURE III.6 – Variation of welfare and external effect with respect to n , A and c

III.C Market share of recyclers

In order to determine the market share of recyclers for each country i , we compute, as a first step, the secondary supply through a bottom-up approach. Our computation of S_t^i is based on the EAF yearly production over the period 1986-2016 (source : World Steel Association yearbooks). Thereafter we apply a coefficient of 0.9 reflecting the average quantity of scrap consumed per tonne of crude steel in the EAF process (source : World Steel Association). Since recyclers do not deal with home and new scrap flows, we use a second coefficient of 0.65, which is the share of old scrap per ton of scrap used (BIR, 2016) ²⁵. Hence, removing imports of scrap and adding exports provides the total secondary supply from recyclers of country i , such that :

$$S_t^i = \underbrace{\underbrace{Q_t^{EAF;i} \times 0.9 \times 0.65}_{\text{Total scrap}} - M_t^{scrap;i}}_{\text{Secondary supply to home steelmakers}} + X_t^{scrap;i} \quad (\text{III.22})$$

Total secondary supply

²⁵It means that we assume, for convenience, an equivalent technology in the EAF process over 1986-2016 and for all countries considered in our database.

From (III.22) we deduce the market share of recyclers such that $\frac{S_t^i}{Q_t^i}$, where $Q_t^i = S_t^i + Q_t^{Y;i}$ is the total consumption of inputs, and $Q_t^{Y;i}$ refers to the iron ore consumed by steelmakers of country i . In this case, recyclers are assumed to only supply home steelmakers. Equation (III.22) allows us to compute the share of home recycling in the old scrap consumed, such that $\frac{(S_t^i - X_t^{scrap;i})}{(S_t^i - X_t^{scrap;i} + M_t^{scrap;i})}$. Results over the period 1986-2016 are given in Table III.5.

TABLE III.5 – Average secondary supply (in Mt) and market share (in %) over the period 1986-2016

	US	UE(27)	China	Japan	Germany	Italy	India	Russia
EAF production	43.9	65.8	33.2	29.1	11.8	16	20.4	12.9
Old scrap consumed	25.7	38.5	19.4	17	6.9	9.4	11.9	8.3
Imports of scrap	2.8	27.1	4.2	0.6	3.5	5.1	3.1	0.1
Exports of scrap	12.5	31.6	0	4.4	7.1	0.1	0	4.3
Total sec. supply	35.3	42.9	15.2	20.8	10.6	4.4	8.8	12.7
Iron ore consumption	57.9	168.7	438.1	126.3	42.5	15	66.5	79.4
Market share	38.4%	18.9%	6.6%	14.1%	20.1%	23.3%	8.8%	13.4%
Ratio of home recycling	90%	31%	78%	96%	53%	45%	72%	98%

On the demand side, the share of the secondary supply requires to focus on old scrap consumed *vs* iron ore, such that :

$$MS_t^{S;i} = \frac{(S_t^i - X_t^{scrap;i} + M_t^{scrap;i})}{(Q_t^{Y;i} + M_t^{iron;i} - X_t^{iron;i} + S_t^i - X_t^{scrap;i} + X_t^{scrap;i})}$$

Hence, Figure III.7 gives the shares of old scrap consumed by steelmakers from each country.

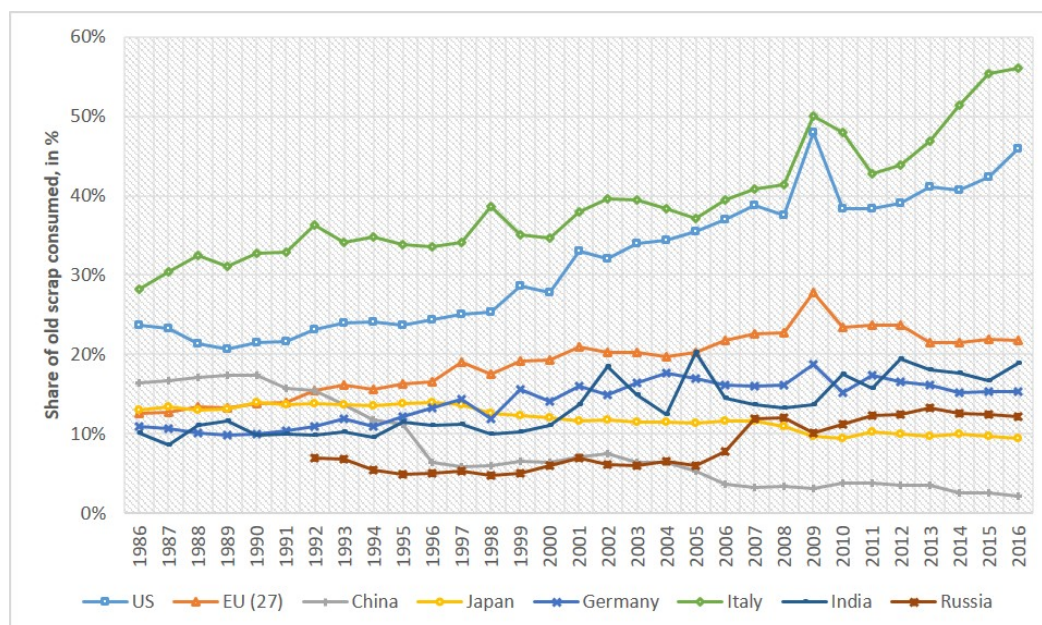
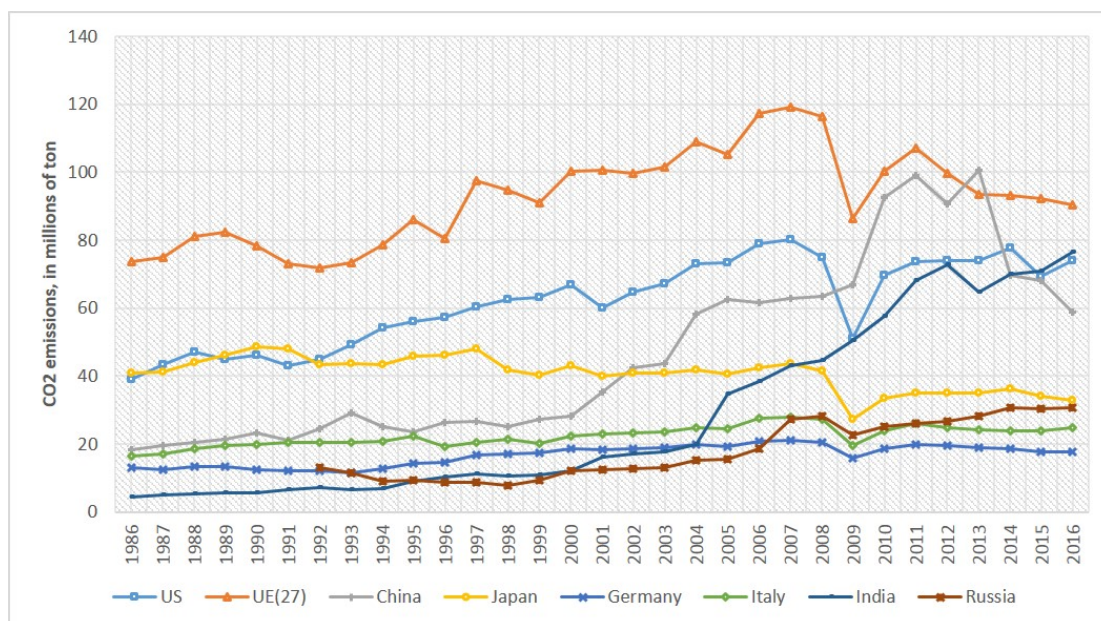
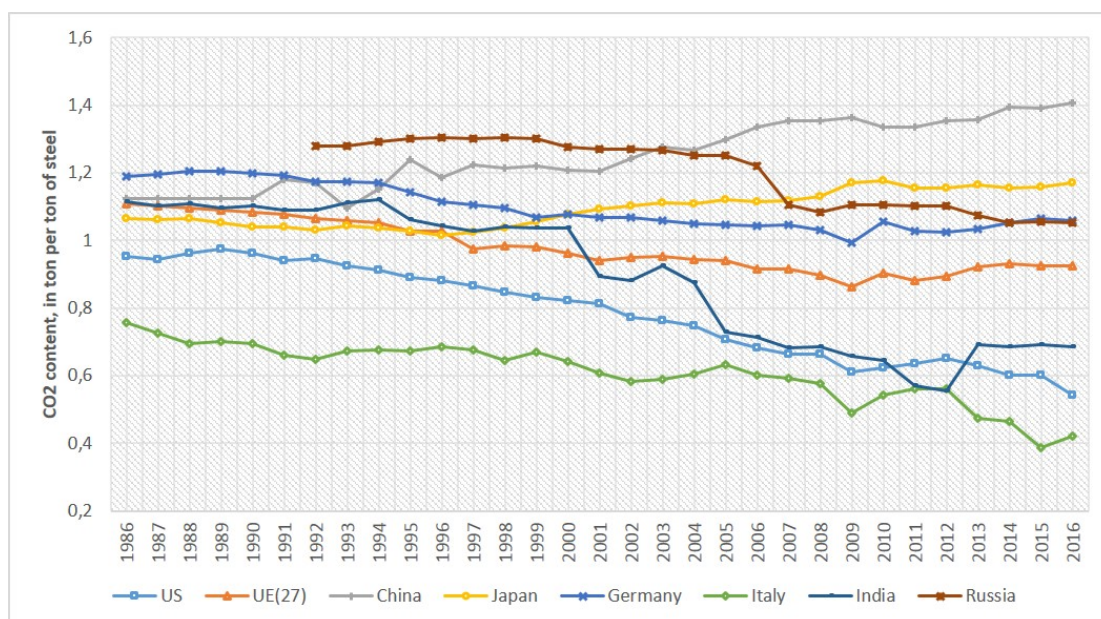


FIGURE III.7 – Share of old scrap consumed by steelmakers

III.D Environmental gains thanks to recycling and CO₂ intensity

Since providing with secondary materials replace 1.1 tons of iron ore and 0.6 tonne of coking coal (Emery *et al.*, 2002), that 0.012 and 0.033 tonne of CO₂ is required to produce a tonne of iron ore (Norgate and Haque, 2010) and a tonne of coal (Guimaraes da Silva *et al.*, 2018) respectively, the CO₂ emissions avoided at the supply of inputs stage can be computed. In addition, since 0.08 and 1.46 tons of CO₂ is required on average to produce one tonne of steel through EAF and BOF respectively (IPCC, 2006), it yields the total CO₂ emissions avoided thanks to recycling (Figure III.8). For convenience, here we assume that the CO₂ ratio per tonne of steel is similar among countries and over the period, although differences might occur according to energy efficiency (*i.e.* technology used in the steelmaking process) and the type of fuel ²⁶.

²⁶Numerous papers sought to determine both CO₂ emission and energy intensities of steelmaking industries. Differences in results also highlight the sensitivity to methodological issues such as factors of conversion and system boundaries (Worell *et al.* (2001); Kim and Worell (2002);

FIGURE III.8 – CO₂ emissions avoided thanks to recyclingFIGURE III.9 – CO₂ intensity of steel

Andersen and Hyman (2001); Pardo and Moya (2013); Siitonen *et al.* (2010); Yi-Ming *et al.* (2007)).

III.E The share of short lifespan steel products

Table III.6 provides a summary of steel consumption by sectors for each country, as well as the average lifetime of each of the related-steel products.

TABLE III.6 – Overview of the share of the steel consumption sectors (in %)

Sectors (lifetime ¹)	China ²	Japan ³	US ⁴	Germany ⁵
Construction (60-75)	57	37	40	31
Transports (20)	11	45	26	26
Industrial equipment (15-30)	30	10	20	22
Metal products (12-15)	3	8	14	18
Value of θ	0.43	0.63	0.6	0.69

1 : Average lifetime from Cooper *et al.* (2014) and Pauliuk *et al.* (2013)

2 : Res. Bank of Australia (2008) ; Deloitte (2018)

3 : Japan Iron and Steel Federation

Available at : <http://www.jisf.or.jp/en/statistics/sij/documents/P6-7.pdf>

4 : American Iron and Steel Institute

Available at : <https://marketrealist.com/2015/01/us-steel-industrys-opportunities-threats>

5 : German Steel Federation

Available at : <https://en.stahl-online.de/index.php/topics/economics/>

III.F Recycling rates

Based on the secondary supply equation $S_t = r(\hat{z}_t)\bar{q}_t$ where $\bar{q}_t$ is the stock of scrap at time t , we compute the recycling rate for each country and each year over the period 2006-2016. Our data for S_t are those used to build Figure III.5.

The stock of scrap is based on the share of products in the consumption of steel and their respective average lifetime (see Table III.6), as well as the total production of steel each year. For instance, assuming a lifetime of 20 years for transport and industrial equipment, and 13 years for metal products, we evaluate

the stock of scrap in 2006 in the US as follows :

$$\bar{q}_{2006}^{US} = \underbrace{(Q_{1986}^{US} + M_{1986} - X_{1986}) \times (0.26 + 0.2)}_{\text{Scrap from transport and industrial equipment}} + \underbrace{(Q_{1993}^{US} + M_{1993} - X_{1993}) \times 0.14}_{\text{Scrap from metal products}} \quad (\text{III.23})$$

where X and M are exports and imports of semi-finished and finished steel products respectively. The overall results are given in Table III.7²⁷

TABLE III.7 – Recycling rates of steel based on short lifespan products over 2006-2016

	China	Japan	US	Germany
Average steel in-use, in Mt based on data 1986-2006				
Production of steel	310.8	105.4	89.1	43.6
Exports	27.4	30.2	7.1	23.8
Imports	17.9	5.4	26.5	20.3
Average stock of scrap in Mt (2006-2016)				
Scrap from 20y. lifespan.	34	47.8	47.4	18.9
Scrap from 13y. lifespan.	3.9	6.4	16.5	6.9
$\bar{q}_{2006-2016}$	37.9	54.2	63.9	25.8
Average secondary supply in Mt (2006-2016)				
EAF production	54.3	25.6	51.4	13.5
Old scrap consumed	31.8	15	30.1	7.9
Exports of scrap	0	7.4	18.3	8.2
Imports of scrap	5	0.3	3.8	5.1
$S_{2006-2016}$	26.8	22.1	44.6	11
Average recycling rate	70.7%	40.7%	69.8%	42.6%

²⁷Note that we also conduct computations with +/- 2 years of products lifetime in each sector, and recycling rates only vary by 1 per cent to 3 per cent. In addition, we have also conducted computations with an average lifetime for all steel products of 20 years. It gives values of recycling rate of 76 per cent, 40,8 per cent, 72 per cent and 40 per cent for China, Japan, US and Germany respectively.

Chapitre IV

The EU Emissions Trading System and the steelmaking industry : Climate policy vs Competition policy

Abstract

Sectors subject to international competition still benefit from free allocation of EU Allowances in Phase III of the EU ETS market. Herein we show that those free EUAs benefit the less efficient firms in terms of emissions and, by doing so, they create overallocation profits for the market leaders. This is particularly striking in the steel industry which is very concentrated with one firm producing approximately 34 per cent of the market alone. To show this, we perform a frontier analysis and show that most free permits are allocated to most polluting firms. Hence, we highlight that by protecting the EU steelmakers from international competition, free EUAs might lead to a potential competition distortion within the EU. As a consequence, a trade-off between the EU climate policy and the competition policy arises.

Keywords : EU ETS, steelmaking, overallocation profits, CO₂ efficiency, free allocation

1 Introduction

As we mentioned in the previous chapter, producing steel through recycling improves social welfare and lowers the sector's environmental footprint. Public policies are needed to encourage a switch from a primary to a secondary supply, although such structural change is not easy to achieve and is subject to constraints. Hence, finding another way to produce steel (and other materials) in a more sustainable way is of interest. In addition to establish upstream policies (*i.e.* on the supply of materials), regulators should also consider the possibilities of action downstream (*i.e.* on the demand for materials). They can provide incentives for steelmakers to use the secondary input in order to decrease their environmental externalities. Hence, the switch to the Electric Arc Furnace (EAF) process might be seen as a structural way of complying with environmental regulations. In the short term, integrated steelmakers can also use scrap as a substitute for ore, to a certain limit depending on production technology. Furthermore, an important room for improvement also exists in technologies related to energy efficiency. For instance, Chinese public authorities have launched various plans¹ to control energy consumption in steelmaking and other energy intensive sectors. In a context where the market shares of the secondary sector continuously decrease (see chapter 3), such plans are at stake to make the Chinese steelmaking industry more sustainable. As a result, energy efficiency standards have been set-up and obsolete factories have closed, leading to an increase of approximately 60 per cent in energy efficiency between 1994 and 2003 (Yi-Ming *et al.*, 2007). A closer look provides an average annual increase of 1.7 per cent between 1994 and 2000 and 11.4 per cent between 2000 and 2003. Yi-Ming *et al.* (2007) estimated that this was mainly due to massive investments in less energy intensive equipment at the end of the 1990s. However, such improvement was mostly observed in private companies and

¹ *e.g.* « National Industrial Structure Adjustment Directory (for steel) », « Outline of China Resources Comprehensive Utilization », « Cleaner Production Standard for Steel Industry », « Construction and Implementation Programme of Energy Management Center in Iron and Steel Enterprises »; Tian *et al.* (2013)

important disparities still remain among Chinese regions.

In the European Union (EU), the Europe 2020 strategy adopted in 2010 promotes « smart, sustainable and inclusive growth ». Among the set of objectives, a 20 per cent decrease in energy efficiency and CO₂ emissions have been proposed by the Commission and the « Strategic Energy Technology (SET) Plan » is defined as the technology pillar of the EU's energy and climate policy. Pardo and Moya (2013) provided a detailed study that assessed the potential of available and forthcoming technologies with the objective of decreasing the CO₂ emissions of the steelmaking industry. To encourage firms to adopt cleaner technologies, the European Union Emissions Trading Scheme (EU ETS) was launched in 2005 and became the cornerstone of European climate policy ².

Herein, we aim to see how the EU ETS affects the steelmaking industry. Since it is one of the most important sources of CO₂ emissions in the EU, complying with the EU ETS is supposed to push for a more sustainable steel either through improving the use of the secondary input or using a more resource and/or energy efficient technology. More specifically, we perform an in-depth economic analysis of the effect of the EU ETS, in particular the switch to Phase III, in terms of competition and CO₂ emission intensity.

As far as we know, this intra-sectoral work is not much realised ³ because it requires data to be collected at a micro-level. Although analysis about the effect of a policy on a regulated sector gain into accuracy with firm-level data, given the existence of access restrictions to this kind of data such a task is not easy to achieve. Another difficulty in collecting data might also arise with a high number of regulated firms (*i.e.* when the market structure tends to be competitive). Here we only focus on the Basic Oxygen Furnace (BOF) process (61 per cent in 2016) and we leave aside the crude steel output made through EAF (39 per cent in

²The EU Directive 2003/87/EC entered into force in 2005.

³For their empirical estimations, Fabra and Reguant (2014) used micro-level data for the Spanish electricity market and Schaefer *et al.* (2010) and Li et Sun (2010) for the aviation sector.

2016). As shown in Table IV.1, a leader firm represents approximately 35 per cent of the market. Three other firms follow with, on average, more than 10 per cent of market shares. The rest of the supply is provided by steelmakers owning on average between 1 per cent to 6 per cent. In addition, the standard deviation results do not show significant variations in market sharing over the period 2007-2016.

TABLE IV.1 – Market shares (2007-2016)

	Mean	Standard Deviation
Arcelor Mittal	0.338	0.0092
ThyssenKrupp	0.142	0.0088
Tata Steel	0.140	0.0086
Riva Group	0.067	0.0104
Voestalpine	0.056	0.0032
SSAB	0.057	0.0032
Salzgitter AG	0.062	0.0045
US Steel	0.045	0.0032
Moravia Steel	0.027	0.0024
Dillinger Hütte	0.025	0.0016
Saarstahl	0.025	0.0033
ISD Dunafer	0.014	0.0033

Few studies dealt with the effect of the EU ETS on the iron and steel industry. For instance, Okereke and McDaniels (2012) conducted a qualitative assessment to show how much three steelmakers exaggerated their vulnerability to carbon pricing. Demailly and Quirion (2008) and Chan *et al.* (2013) found evidence that the sector was not affected by the EU ETS. According to the former, « the tightening environmental stringency of the ETS in the second period should not be opposed on grounds of competitiveness losses ». However, they took the sector as perfectly homogeneous and used aggregated data while, according to Reinaud (2008), « costs estimates for aggregate industry hide considerable intra-sector variations, and leakage rates tend to be more significant where differences are taken

into account (*e.g.* differences in emission levels or in geographical location) ». Regarding the latter, the empirical estimation did not distinguish steel made through iron ore and recycled materials while the industrial processes differ a lot and are therefore subject to a different treatment within the EU ETS.

The chapter is structured as follows. Section 2 gives elements of understanding of the EU ETS rules through the main related literature. Section 3 focuses on how the EU Allowances (EUAs) affect steelmakers in terms of pollutants intensity. Section 4 creates a link between competition and the EU ETS while Section 5 concludes the chapter.

2 The EU ETS as the cornerstone of the European climate policy

In addition to provide a summary of the abundant literature about the EU ETS (first subsection), we focus on the way EUAs are distributed among regulated firms and across Phases (second subsection).

2.1 Insight of the literature review

The most recent data released by the European Commission showed that the greenhouse gas emissions (GHG) regulated by the EU ETS rose for the first time in 2017. After an increasing trend from July 2017 onwards, the EUAs crossed the € 10 threshold in February 2018 reaching € 25 for the December 2018 futures. As the cornerstone of European climate mitigation policy, the EU ETS faced concerns and scepticism regarding its lack of effectiveness (Laing *et al.*, 2013). Even though few studies showed a positive effect in terms of CO₂ reductions (Ellerman and Bunchner (2008); Ellerman *et al.* (2010); Egenhofer *et al.* (2011); Dechezlepretre *et al.* (2014)), especially during the first two years, others have underlined the risks of implementing such a policy and have highlighted the broader impact of

the EU ETS. Additionally, since a number of countries or regional authorities have set up their own ETS, or intend to do so (*e.g.* Australia, California, China, New-Zealand, Quebec, South-Korea), an abundant litterature has emerged. The focus is not on making comparisons with other environmental public policies anymore but rather on the way to make ETS more efficient.

For instance, the question about the CO₂ price determinants raised interest among researchers especially regarding its collapse by mid-2007 and the structural changes in the scheme (Hintermann (2010); Creti *et al.* (2012); Koch *et al.* (2014); Mansanet-Bataller and Sanin (2014); Aatola *et al.* (2015); Ying *et al.* (2017)). While energy variables appear to be the most natural determinant ⁴, policy factors such as mechanism design can also have a strong impact on the EUAs by, for instance, being too generous with regulated firms. One of the main benefits of using cap-and-trade for emission reductions, as opposed to command-and-control methods, is that they allow for an overall reduction in emissions at minimum cost. The fact that all agents face the same price for emissions (*i.e.* the price of permits in the emissions markets), assures that, with other distortions absent, the lowest abatement cost allocation will be achieved. However, the large variety of models considered reflect difficulties in analysing such a permit market because of uncertainties of the regulatory and economic environment (*e.g.* mechanism design, national climate policies, energy prices, economic activity). In addition to price determinants studies, a large part of ETS-related literature is devoted to the effect of the EU ETS on regulated sectors' competitiveness. The extra costs induced by implementing abatement technologies or more generally by complying with climate policy requirements, are at stake in particular for firms highly exposed to international competition. Hence, the induced risk of carbon leakage ⁵ is of strong interest to policy makers and attracts attention from academics.

⁴The electricity sector is responsible for approximately 39 per cent of European CO₂ emissions.

⁵In Energy-Intensive and trade-exposed sectors such as cement, chemicals and steel, leakage may occur because of output shifts to unregulated plants, either within the EU or abroad. It may also occur because regulated plants outsource carbon-intensive parts of the production process (Muuls *et al.*, 2016).

After several years of existence and better data access, a small but growing academic literature emerged to show evidence on the effects of the EU ETS on the regulated sectors (Martin *et al.*, 2014). These ex-post analyses confirmed ex-ante theoretical works that the effects on competitiveness are moderate as long as permit allocation is free of charge, which has been one of the responses to deal with the EU firms highly exposed to international competition. While Wagner *et al.* (2014) focused on French manufacturing firms and Jaraite (2016) on the Lithuanian industry, Petrick and Wagner (2014) used firm-level data to estimate the causal effect of the EU ETS on the regulated German manufacturing sector regarding economic criteria (employment, competitiveness) as well as CO₂ emissions. Similarly, in their ex-post econometric study Abrell *et al.* (2011) did not find a significant negative effect of the programme on the competitiveness of a panel of European firms, at least for Phase I and the beginning of Phase II. However, results about the effect of the EU ETS coming from this intersectoral literature might differ from one sector to another, at least in their magnitude.

At the same time, a large body of the related literature aims to analyse a single sector with different methodologies, theoretically and/or empirically according to data availability. For instance, while Alexeeva-Talebl (2011) dwelt on the EU petroleum market through a cross-country analysis, Sijm *et al.* (2006) estimated the impact of the EU ETS on the power sector at an aggregate level by comparing a situation with and without the policy.

2.2 EUAs allocation rules

The cap for Phase I and Phase II discriminated in terms of reduction efforts among countries in what was called the National Allocation Plans (NAPs). From Phase III there is a European-wide cap on emissions (*e.g.* in July 2010, in its Decision 2010/384/EU, the EC determined the cap from 2013 onward). Among other adjustments, a lower cap is decided. Compared to 2005, the reduction in the supply of allowances in 2020 (*i.e.* at the end of Phase III) is established to reach a reduction as compared to the 1990 levels of 21 per cent. The European

Commission (EC) is currently considering tightening that target to a 25 per cent or 30 per cent reduction. Regarding the allocation rule during Phase I, about 97 per cent of EUAs were distributed for free to regulated installations and to 90 per cent for Phase II. In Phase III roughly half of the allowances are distributed through an auction while sectors considered subject to international competition, like the iron and steel sector, continue to receive EUAs for free. The way those free EUAs are allocated has interested several articles (*e.g.* Fischer (2001); Colombier and Neuhoff (2007); Sterner and Muller (2008); Muuls *et al.* (2016)).

After each year, operators of regulated installations must return enough allowances to cover all of their emissions, each allowance representing one tonne of CO₂ equivalent. The practice of banking of allowances was prohibited between Phase I and II but allowed between II and III. The way free EUAs are allocated has attracted interest in several articles. By comparing Historical-Based Allocation (HBA) and Output-Based Allocation (OBA), Quirion (2009) explained how, in HBA, a rational profit-maximising firm includes the anticipated value of emissions per unit produced in its marginal cost, that in a competitive market pushes the firm to reduce its output. The main difference between these two mechanism designs lies in the fact that with HBA, an installation received a number of allowances according to its historical emissions. Instead, in the OBA scheme, the allocation of allowances allocation is proportional to current output levels and the installation includes the value of the additional allowances received for each unit produced in their marginal revenue. In Phase I and II of the EU ETS, the HBA ruled while for Phase III, another scheme has been set up. Many studies looked at the reasons for this switch especially regarding the flaws of the initial allocation rules (*e.g.* Betz *et al.* (2006); Anderson and Di Maria (2011); Sartor *et al.* (2014)).

For instance, the decentralised system led to heterogeneity of allocation mechanisms and to protect their industry, some member states tended to overallocate. The main reason is that HBA rewards the higher CO₂ intensive installation while this scheme does not take early action into account. Finally, it is now well documented that the EU ETS has been oversupplied in allowances, especially after the

2008 economic crisis. In order to address the above issues, the European Commission switched into what Meunier *et al.* (2014) called a capacity-based allocation, or Sartor *et al.* (2014) and others, a benchmark-based allocation (henceforth BBA). As explained by Branger *et al.* (2000), this system combines an *ex-ante* calculation of an allocation based on historical output, and an emission intensity benchmark. An adjustment can also be made according to capacity extension or reduction, plant closure and/or the arrival of new entrants.

The annual number of allowances to each installation concerned by the free allocation process (*i.e.* not auctioned), is delivered through the following formula :

$$FA_{i,p,t} = BM_p \times HAL_{i,p} \times CLEF_{p,t} \times CSCF_t$$

where $FA_{i,p,t}$ is the free allocation granted to i for its product p in time t ; HAL is the historical activity level; $CLEF$ is an allocation reduction factor applied to installations considered not to be at risk of carbon leakage; $CSCF$ is a uniform cross-sectoral correction factor that can be applied to ensure that the total free allocation will not exceed the maximum annual amount of free allocation; and BM is the emissions-intensity benchmark of product p . As we can see with this formula, the BBA process in place for Phase III in the EU ETS is a combination of historical emissions (*i.e.* from HBA) and a product benchmark (*i.e.* from OBA). The level of the benchmark is of particular interest since this determines the stringency of the ETS on a determined sector, which in this case, is the iron and steel industry.

3 Heterogeneity in CO₂ and allowances among the steelmaking installations

Based on an installation-level database, we compute the CO₂ emissions intensities in the first subsection, while in the second subsection we analyse the distribution of allowances among the steelmaking installations.

3.1 Data

We use an original database with 28 steelmaking installations representing 91 per cent of EU steelmaking production (on average from 2007 to 2016) ⁶. The 336 observations about crude steel production come from the annual reports of the firms and the 2016 World Steel Statistics Yearbook. Information on the features of the facilities in the EU is collected from the German Federation of steel. The CO₂ emissions, as well as the allowances allocated, are extracted from the European Union Transaction Log (EUTL) for the period 2007-2016 that we cross checked with the European Pollutant Release and Transfer Register (E-PRTR) and the database from Branger (2015).

In a nutshell, the production of crude steel in an integrated steelmaking installation requires three preceding processes namely coke making (NACE code Rev.2 : 19.10), sintering (NACE code Rev.2 : 07.10) and iron making (NACE code Rev.2 : 24.10). The former is the conversion of metallurgic coal to coke, while the second one consists of agglomerating different grain sizes of iron ore with additives to form a material. The coke as reducing agent and the sintered ore (*i.e.* agglomerated iron ore) are then feed into a blast furnace to produce liquid iron which is called hot metal. Finally, the last step takes place in a Basic Oxygen Furnace to remove unwanted elements and as much of the residual carbon in order to convert the metal into crude steel of the required quality. Each operation holds in different units of the steelmaking installation. To assess the CO₂ emissions of our 28 installations, various system boundaries might be considered depending on the structure of flows. More precisely, installations might be connected to a power plant that recovers gases from each operation and produces electricity for steelmaking. Hence, owning such equipment is at stake for steelmakers since it represents one of the best ways of reducing emissions (Pardo and Moya, 2013). The more efficient the power generator, the cleaner the steel production will be. This plant is either owned by the furnace operator or an external electricity-producing

⁶We leave aside six installations because of issues with data collection.

company. However, we do not include it in the system boundaries because of issues with data access. Firstly, the share of electricity that is used for steel compared to what is injected into the local network, is unknown. Secondly, we do not know how much additional electricity might be imported since the overall electricity demand for steelmaking can be higher than what is produced in the related power plant.

Hence, in the chapter, we only focus on the direct emissions which are related to the four main steps mentioned above and are needed to produce a crude steel output. On average, the share of the coking plant in total sector emissions is 9.1 per cent while for the sinter plant the share is 12.7 per cent (Ecofys, 2009). The most CO₂ intensive part of the process refers to the two other steps covering the hot metal and crude steel production with approximately 69.3 per cent ⁷. The rest of the emissions are related to the downstream process (*i.e.* hot and cold rolled steel).

Using our dataset, we compute the CO₂ emission intensity for each installation i in time t , as :

$$EI_{i,t} = \frac{Emissions_{i,t}}{Crude\ steel\ output_{i,t}}$$

.

TABLE IV.2 – CO₂ Emission Intensities of the EU steelmaking installations (2007-2016)

	Mean	SD over the period	SD among the installations
All installations	1.383	0.082	0.481
The 5 most efficient	0.873	0.039	0.066
The 5 less efficient	2.157	0.154	0.196

Results in Table IV.2 show that despite the existence of a « BREF » document

⁷These figures which are indications from 2005-2008, should be considered cautiously since they are « extremely sensitive to small changes in the raw data and the raw data itself is prone to high uncertainties ».

⁸ which encompasses technologies to help steelmakers to reduce their emissions, a significant gap between the less and the most efficient installations remains. The standard deviation figures over 2007-2016 show a very low variation of the CO₂ intensity of the latter. Conversely, the less efficient ones decrease (slightly) their CO₂ intensity leading to a higher standard deviation. There is also a stronger heterogeneity of CO₂ intensity among those less efficient installations, compared to the more efficient ones. Besides, we note only a few differences in the rankings of the best and least efficient installations over the period. For instance, two of the most CO₂ efficient installations in 2016 were ranked 6th and 9th in 2007, while the four less efficient installations in 2007 and 2008 are maintained as less CO₂ efficient in 2015 and 2016.

It is worth mentioning that studies on the physical drivers of CO₂ intensity highlight the role of energy efficiency determinants such as the presence of a combined heat and power solution, or various innovative technologies either used in each production step or to abate emissions. Also, the carbon content of consumed materials and the iron content of the ore, as well as the share of scrap in the steel process, can play a significant role in explaining the level of CO₂ emission intensity (Worell *et al.* (2001); Siitonen *et al.* (2010); Pardo and Moya (2013)). These factors can explain the observed heterogeneity among installations. Regarding the potential effect of the EU ETS, we do not have a structural break in the emission intensity that would be caused by the switch from Phase II to Phase III.

3.2 Distribution of allowances : BM value and Output-Based Allocation

Between 2005 and 2012, each installation was granted with free allowances regarding its past level of emissions. The switch to Phase III introduces a harmonised benchmark that is basically the average performance of the 10 per cent most effi-

⁸Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production adopted within the IPPC Directive (2008/1/EC) and the IED Directive (2010/75/EU) for several industrial sectors.

cient installations in a sector in the EU between the years 2007-2008. Installations that have an emission intensity above the BM have to buy the excess of EUAs at the market price. For the iron and steel sector, things are a little different. According to Decision 2011/278/EU (Art.11), « in particular, due to a lack of data on the treatment of waste gases, heat exports and electricity production, the values for the product benchmarks for coke and hot metal have been derived from calculations of direct and indirect emissions based on relevant energy flows provided by the relevant BREF ». Hence, according to available data and after consultations with stakeholders, the BM for this sector has been set up as follows :

$$\begin{aligned} BM_{coke} &= 0.286 \text{ EUA} \\ BM_{sinter} &= 0.171 \text{ EUA} \\ BM_{hot \text{ metal}} &= 1.328 \text{ EUA} \end{aligned}$$

According to the BREF document, to produce one tonne of crude steel, on average, 1.08 tonnes of iron ore and 0.359 tonnes of coke are required. These figures led us to consider that the BM for crude steel production is equal to :

$$BM_{crude \text{ steel}} = BM_{coke} \times coke \text{ ratio} + BM_{sinter} \times iron \text{ ore ratio} + BM_{hot \text{ metal}} \quad (IV.1)$$

$$BM_{crude \text{ steel}} = 0.286 \times 0.359 + 0.171 \times 1.08 + 1.328 \quad (IV.2)$$

$$BM_{crude \text{ steel}} = 1.616 \quad (IV.3)$$

Taking into account the four step process, the integrated steelmakers having an emission intensity equal to 1.616 t of CO₂ per tonne of crude steel, receive enough allowances to fully cover their emissions for a year. Installations that have a level below this BM will have to buy EUAs or decrease their emissions. However, if we compute a benchmark based on the common rule (*i.e.* set up for other regulated sectors) of the 10 per cent most efficient installations, we have : $\widehat{BM}_{crude \text{ steel}} = 0.841$. Only installations emitting 0.841 tonnes of CO₂ per tonne of crude steel would fully cover their emissions with free allowances. It is less than

twice the value of the BM used to deliver current allowances.

Figures IV.1, IV.2 and IV.3 show how much free allocations cover CO2 emissions. A rate of over 200 per cent means they have more than twice the number of allowances required to comply with the EU ETS rules. Conversely, an 80 per cent rate means that installations must buy 20 per cent of additional allowances than what they received for free. The current benchmark-based allocation is compared with alternatives namely, the estimated benchmark-based allocation and the output-based allocation.

Regarding the former, using the $\widehat{BM}_{crude\ steel}$ value, we have rebuilt the distribution of allowances in Phase III with (IV.1). Since the iron and steel sector is considered at risk of carbon leakage we have $CLEF = 1$ for all years. The coefficient $CSCF_t$ takes the following values 0.942721, 0.926347, 0.909780 respectively for the years 2013, 2014 and 2015 (Commission Decision 2013/448/EU). The HAL value refers to the median annual production level from 2005-2008 for all installations and we have $\widehat{BM}_{crude\ steel} = 0.841$. Regarding the OBA as our second alternative allocation system, we reallocated allowances for Phase III according to the CAP of -20 per cent of the CO2 emissions from 2005 to 2020.

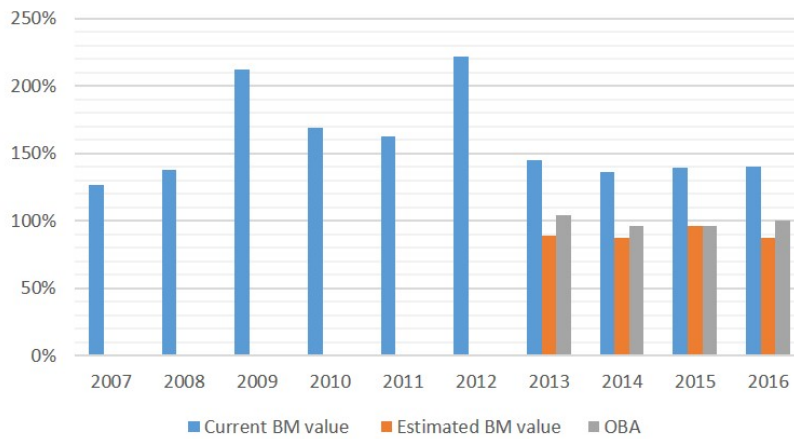
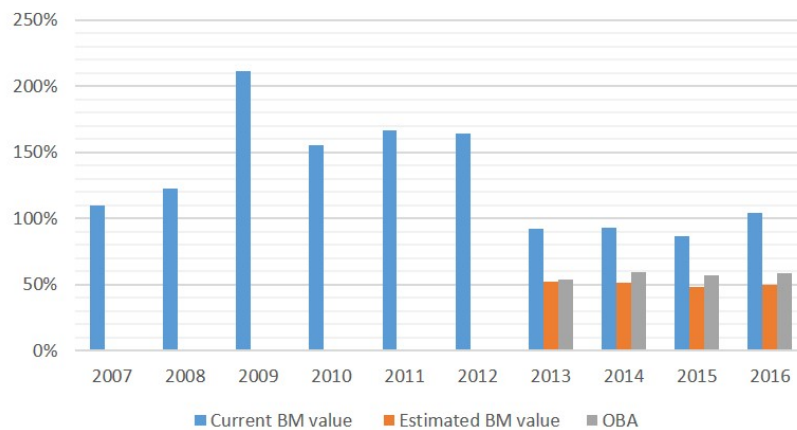


FIGURE IV.1 – Average allocation for all installations

Firstly, regarding the period 2007-2012, we can clearly see the effect of the

FIGURE IV.2 – Average allocation for the most CO₂ efficient installationsFIGURE IV.3 – Average allocation for the less CO₂ efficient installations

2008 crisis, no matter what the level of CO₂ efficiency of the installations is. The collapse in steel production made CO₂ emissions less intense and since allowances were delivered according to historical emissions, the oversupply was very significant. This oversupply feature is well documented in the literature and has lasted throughout Phase II.

Focusing on Phase III from 2013 to 2016, differences are significant among installations. While the most efficient steelmakers still benefit from a large overallocation with the current benchmark (*i.e.* twice the level of EUAs required to fully

cover their emissions), it seems that adopting new rules for Phase III made the less efficient installations, buyer of allowances for a slight proportion (assuming they choose to cover emissions through the market instead of reducing their emission intensity).

As expected, the lower estimated $\widehat{BM}_{crude\ steel}$ makes compliance with EU ETS for the less efficient installations more stringent. In addition, differences with OBA are not significant, unlike what is observed for the most CO₂ efficient installations. Indeed, such alternative allocation would allow them to still benefit from a generous overallocation.

4 EU ETS and competition

To reflect how competition can be affected by the EU ETS, in this section we shift from an installation-level to a firm-level database.

4.1 Market shares and overallocation profits

Table IV.3 provides a summary of our database. In addition to the absolute values of CO₂ emissions and output already used in the previous section, we have collected data on iron ore and coking coal consumption for each firm. This data comes from the 2016 Worldsteel Association Yearbook and from International Energy Agency (IEA) statistics.

As mentioned previously, in this chapter we only focus on the BOF process and leave aside the crude steel output made with recycling⁹. Moreover, as we have shown in Table IV.1, the crude steel production is dominated by a market leader. Since the firms are granted with more free allocations than what they need to fully cover their emissions and based on the overallocation shown in the previous section, the iron and steel industry might benefit from important overallocation

⁹Even though 85-95 per cent of steel products can be made either through EAF or BOF, the highest added value products are only made with the integrated steelmakers. This market segment is of interest for aircraft and energy industries that need pure steel.

TABLE IV.3 – Summary statistics

	2007				2016			
	Mean	Med.	Min.	Max.	Mean	Med.	Min.	Max.
Output ('000 tons)	8 659	5 363	918	39 783	7 801	5 433	1 041	32 257
CO ₂ Emissions ('000 tons)	11 885	5 593	1 156	63 966	9 733	6 491	957	42 113
CO ₂ intensity	1.277	1.259	0.931	2.059	1.202	1.155	0.920	1.968
Nbr of free EUAs (thousands)	13 790	6 374	2 141	83 257	12 653	7 010	1 995	53 533
Free EUAs per ton of CO ₂	1.162	1.036	0.847	1.852	1.356	1.254	0.685	2.084
Iron ore cons. ('000 tons)	12 737	8 514	2 085	55 516	11 003	7 272	1 208	44 304
Coking coal cons. ('000 tons*)	6 547	3 514	1 218	28 508	4 489	2 643	1 063	19 409
Number of firms (installations)	13(28)				12(25)			
Average price of EUAs (Euros)	24.2				5.3			

**Note : Data for coking coal consumption in 2016 being not available, we use data from 2015.*

profits¹⁰. They are computed for each firm with the excess of allowances and the yearly average price of the EUA. Figure IV.4 highlights the tremendous gap between firms, in absolute terms. With € 4,295 billion, the leader has even more than twice the overallocation profits of the second steelmaker (€ 1,987 billion), and it represents three times more than the third one (€ 1,153 billion). Regarding the top five steelmakers benefiting from the EU ETS, our results are in line with what Sandbag (2011) observed before 2011 and called the « Fat Cats ». However, our estimations slightly differ in two points. Firstly, we have left aside a few installations from our database because of data issues regarding their level of output. Secondly, cumulated overallocation profits are computed with a yearly average price, which means that steelmakers are assumed to sell their surplus of EUAs each year. Instead, Sandbag (2011) used a constant value of € 17 (06/05/2011) which means that they assume that steelmakers sell their surplus at the end of the sample period 2008-2010.

Relative to what the firm produced, this overallocation profit is rebalanced

¹⁰According to Branger (2015), « overallocation profits can be distinguished from windfall profits, which refer to the profits from free allocation where emitters additionally profit from passing on the marginal CO₂ opportunity cost to product prices, despite receiving the allowances for free. Overallocation profits can occur even in the absence of cost pass through, if output falls short of historical levels ».

between the leader and the main steelmakers, but a gap remains with the five smaller producers.

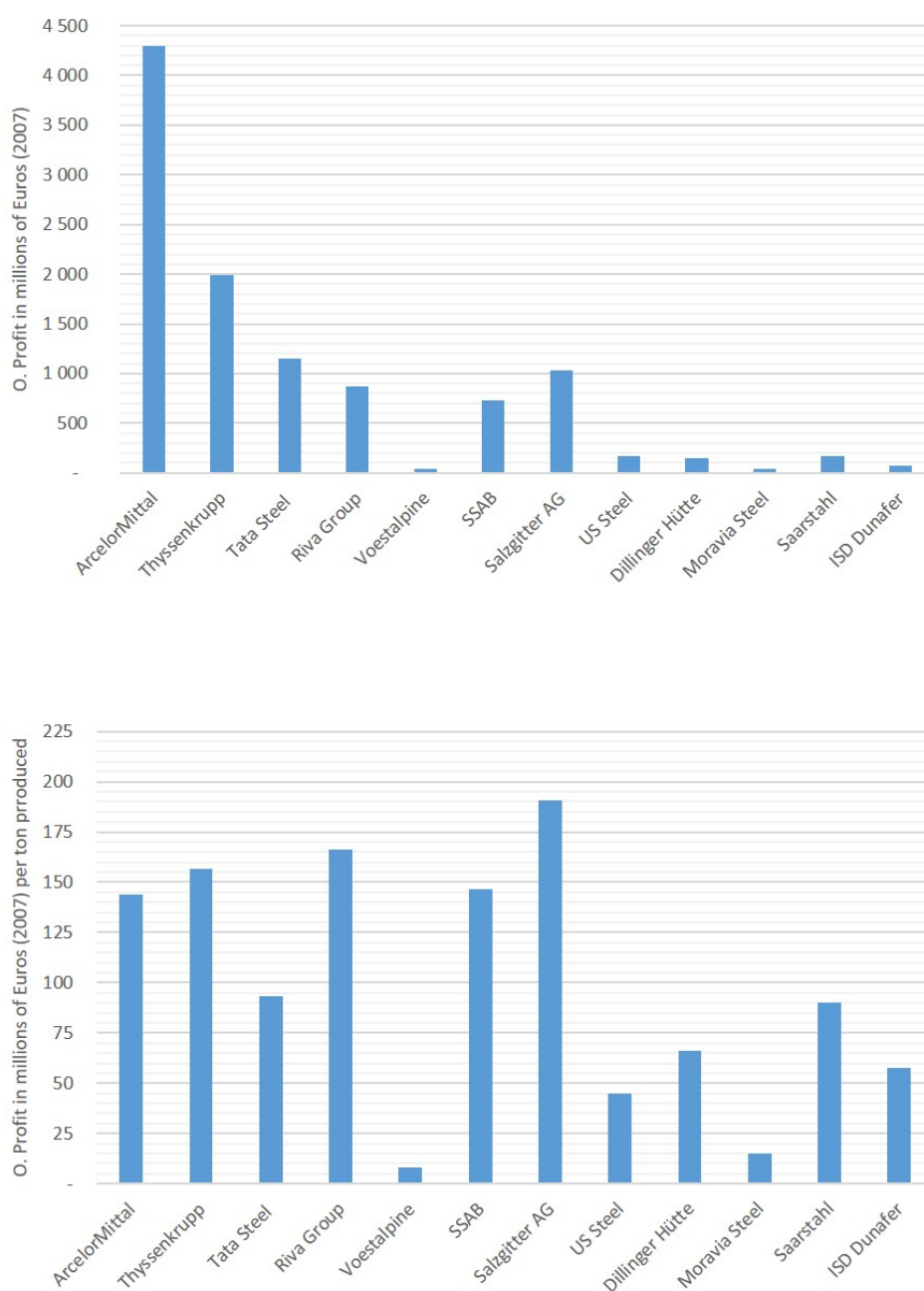


FIGURE IV.4 – Cumulated overallocation profit from 2007 to 2016, in absolute terms (top) and per ton produced (bottom)

To reflect this heterogeneity better, Table IV.4 presents the share of the individual overallocation profit compared to the overall one granted to the iron and

steel sector according to the EU ETS Phases. In 2007 (*i.e.* the last year of Phase I), results show that the leader captured slightly less than 80 per cent of the total overallocation profit while the negative values show that the EU ETS was costly for a few firms. A readjustment of the overallocation profit sharing occurred in Phase II, to the detriment of the leader and in favour of the three other main steelmakers. This trend is also observed in Phase III where the main producers have an equivalent share of the overall overallocation profit (except Tata Steel).

TABLE IV.4 – Share of the firm's overallocation profit with respect to the overall granted to the sector

	Phase 1 (2007)	Phase 2 (2008-2012)	Phase 3 (2013-2016)
Arcelor Mittal	0.777	0.397	0.244
ThyssenKrupp	-0.049	0.198	0.244
Tata Steel	0.102	0.115	0.100
Riva Group	-0.042	0.055	0.257
Voestalpine	0.028	-0.003	0.034
SSAB	0.144	0.065	0.042
Salzgitter AG	-0.001	0.114	0.042
US Steel	-0.003	0.025	-0.031
Dillinger Hütte	0.004	0.015	0.005
Moravia Steel	-0.002	0	0.029
Saarstahl	0.004	0.018	0.006
ISD Dunafer	0.039	0	0.028

Finally, by computing the average overallocation profits of Phase III with our alternative allocation using the $\widehat{BM}$ value, we illustrate in Figure IV.5 the firms that benefit the most from undervaluation of the benchmark and still make important overallocation profits, which they should not do. The wider the gap between orange and blue bars, the more « unfair » the distribution of overallocation profits appears to be.

With the current allocation method, the free allowances are considered subsi-

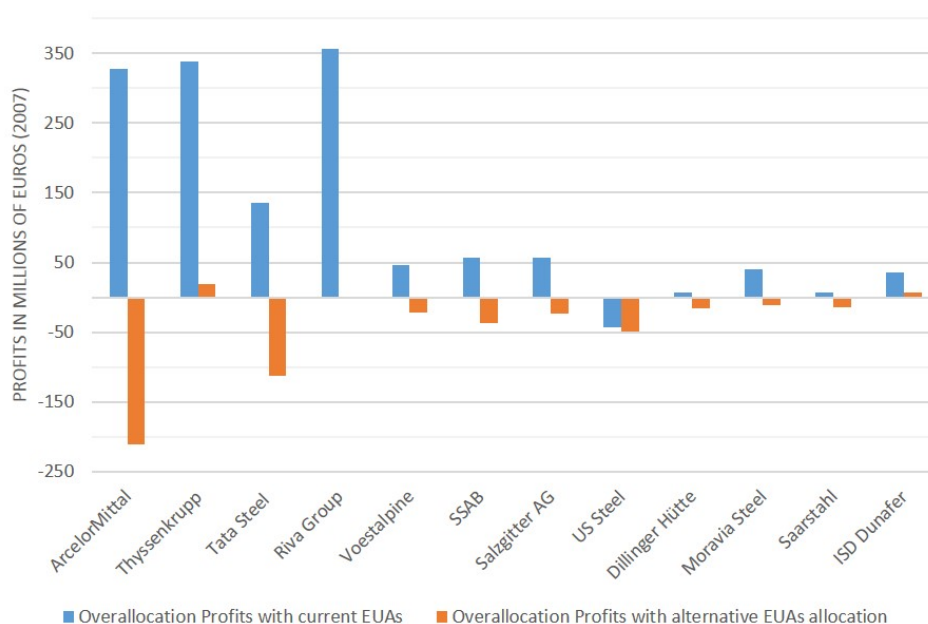


FIGURE IV.5 – Overallocation profits of 2013-2016 with the current BM compared to our estimated BM

dies and seem to benefit the most dominant firms, even when overallocation per ton of output is considered. This does not help the market to be more competitive, although we observe that the market shares remained constant over the period 2007-2016.

While EUAs are provided for free in order to protect from international competition, such a measure seems to have a negative effect on EU competition and does not help the efficiency of the EU climate policy. Hence, a trade-off between EU competition law and EU climate policy arises.

In addition, we might wonder whether at least the apparent unfair sharing of overallocation profits corresponds to the CO₂ emissions performance of the firms.

4.2 Measuring efficiency with a DEA-based environmental performance evaluation

To assess the efficiency and provide information on the rankings of the firms in terms of their relative CO₂ emission performance, we use a Data Envelopment

Analysis model (DEA) ¹¹. Unlike the standard DEA models, we integrate environmental externalities as an undesirable output. A Directional Distance Function technique representing the distance between observed and efficient fictive values, is used. Basically, it allows us to estimate how much the installation's efficiency can be improved relative to the level reached by the most efficient installations.

The twelve firms in our database produce a crude steel output with the following two main materials : coking coal and iron ore. The firms also produce an undesirable output which is the volume of CO₂ emissions. From this data, we can compute the material consumption intensity for each firm and the efficient frontier regarding the two periods before and after the switch of the EU ETS allocation methods (Figure IV.6). We first observe that ISD Dunafer and Voestalpine remain the most efficient firms between the two periods, compared to the others. The latter even decreased its intensity in both inputs. These two firms established on the best-performing practice frontier, are used as a reference of comparison for the inefficiently performing firms.

We also point out the relative distance to the efficient frontiers of the two main steelmakers : ArcelorMittal and ThyssenKrupp. While the latter seems to have decreased its relative input intensity between Phase II and III (*i.e.* the length of the orange solid arrow is shorter than the length of the orange dashed arrow), it seems that ArcelorMittal has improved its relative consumption of input per output, compared to the most efficient firms.

Unlike what is expected in theory, here the leader is not the most efficient firm in consumption of inputs. Among other reasons, this can be explained by a vertical integration strategy set up by ArcelorMittal and Tata Steel. By buying mining assets it allowed them to rely less on the soaring prices that occurred throughout 2000s ¹². For instance, regarding the iron ore which, in 2011, represented approximately 40 per cent of the total cost in steelmaking (Faure, 2012), the

¹¹For methodological details, see Appendix IV.A

¹²In 2007, ArcelorMittal's CEO estimated that 46 per cent of its material consumption was provided by its own deposits, and 65 per cent was set up as a 2012 goal (source : Usine Nouvelle (in French) ; www.usinenouvelle.com/article/arcelormittal-assoit-son-leadership.N23648).

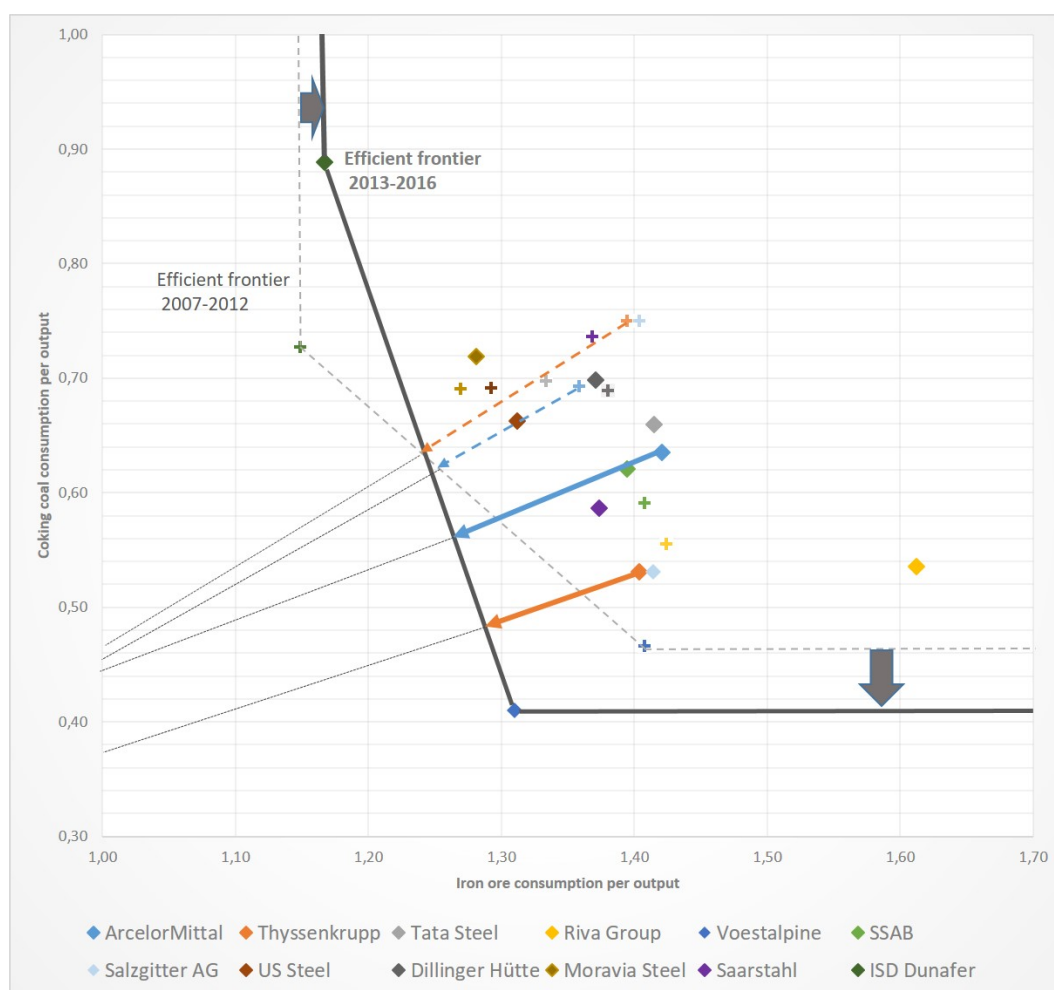


FIGURE IV.6 – Input intensities and efficient frontiers for the periods 2007-2012 and 2013-2016

price rose from US\$ 12 per tonne in 2002¹³ to more than US\$ 150 per tonne, ten years later. In addition, ArcelorMittal entered into the European market through an external growth strategy. Their choice in buying installations might have been made according to other input costs such as labour and energy, which represented respectively 10 per cent and 12 per cent of the total cost in 2011. The former appears to be lower in the Central and Eastern European countries like Romania and Poland where ArcelorMittal invested, while the latter appears to be very low in France, where the firm also bought big integrated steel plants in 2006. However,

¹³Yearly average nominal price, 62 per cent of Fe content (source : International Monetary Fund)

gains from lower costs of input per output might be counterbalanced by the level of technology in each installation.

Given this distribution of material intensities and the level of CO₂ emissions for each firm we can compute the relative CO₂ emission efficiency score, thanks to the linear model defined in (IV.7) and based on our cross-sectional data. Results shown in Appendix IV.B allow us to rank firms yearly between 2007 and 2015, as presented in Table IV.5.

TABLE IV.5 – Rankings from the CO₂ emission performance scores of the steel-making firms (2007-2015)

Firm	Average	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Voestalpine	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ISD Dunafer	2	1	1	1	1	1	1	1	4	1
Salzgitter AG	3	1	2	5	4	2	3	2	2	2
Moravia Steel	4	1	1	1	5	5	4	3	1	5
SSAB	5	3	4	1	1	6	6	6	5	11
US Steel	6	5	9	4	3	9	7	1	6	7
Tata Steel	7	1	5	1	10	11	2	9	3	3
ThyssenKrupp	8	4	3	7	7	7	9	5	9	4
Riva	9	2	6	3	2	10	5	10	10	9
Dillinger Hütte	10	8	8	6	6	3	10	7	8	8
Saarstahl	11	6	7	8	9	8	11	4	7	6
ArcelorMittal	12	7	10	2	8	4	8	8	11	10

We observe that including CO₂ emission intensity in the analysis does not prevent the two firms on the efficient frontier (Figure IV.6), namely Voestalpine and ISD Dunafer, from still being the most efficient. Regarding the bottom of the ranking we find that, on average, between 2007-2015, the leader appears to be the least efficient in using material inputs and emitting CO₂ emissions in order to produce steel. While studying overallocation profits (see Table IV.4, Figure IV.4 and Figure IV.5) highlights how much EU ETS gave advantage to the leader over 2007-2016, here we observe that ArcelorMittal is the least efficient compared to the other steelmakers. Worse than that, the two most efficient firms, Voestalpine and ISD Dunafer, are also the ones who have had the lowest cumulated overallocation

profits over 2007-2016.

Hence, it seems that by rewarding the least efficient steelmaking firm, who is also the market leader, EU climate policy comes into conflict with EU competition policy.

Regarding the dynamic of the CO₂ efficiency through the Malmquist-Luenberger Productivity Index (MLPI), we assume two technologies for Phase II and Phase III so that we use average input and output values for 2007-2012 and 2013-2015 respectively. Results of the MLPI in Table IV.6 indicate that Voestalpine is the firm who improved its relative productivity the most between the two periods. This improvement seems to be done through a technical progress ($MLTC > 1$). However, it seems that Riva and SSAB were not able to produce more outputs with lower use of inputs and undesirable outputs. This change fits with results shown in the rankings (Table IV.5) and appears to be mainly driven by technical efficiency losses ($MLTEC < 1$). We also observe that except for three to four firms, the efficiency change is rather slight since the score is close to one.

We have also extended the MLPI analyses by including the free EUAs as input. Since, they were not provided with the same amount of free EUAs per tonne of CO₂, this heterogeneous « subsidy » considered here as input makes the ranking different from the one observed in Table IV.6. The scores obtained in Table IV.7 reflect how efficient the firm has been relative more efficient in its use of input and CO₂ emissions regarding the number of free EUAs it has been granted in the two periods. The high score for eight of the twelve firms is mostly due to the lower level of free EUAs granted in Phase III. Regarding the number of allowances received, the material and CO₂ intensities, it seems that Tata Steel has been the most efficient in the switch from Phase II to Phase III. In this case the EU ETS' new allocation method might be interpreted as a success. By considering free EUAs as input, we also show that the best relative improvement of efficiency for Voestalpine, does not seem to be mainly driven by the EU ETS. Conversely, the

increase in the number of free allowances given to Riva between Phase II and Phase III, combined with its lower efficiency performance compared to others, push it towards the bottom of the ranking. The EU ETS allocation method seems to be in this case, useless.

TABLE IV.6 – Comparison of efficiency with respect to the EU ETS Phases

Firm	MLPI	MLTEC	MLTC
Voestalpine	1.0736	1.0000	1.0736
Saarstahl	1.0497	1.0385	1.0108
ThyssenKrupp	1.0224	0.9999	1.0225
Salzgitter AG	1.0099	1.0076	1.0022
Tata Steel	1.0072	1.0008	1.0065
US Steel	1.0032	1.0014	1.0018
Dillinger Hütte	1.0026	0.9954	1.0073
Moravia Steel	0.9979	1.0104	0.9875
ArcelorMittal	0.9868	0.9688	1.0186
ISD Dunafer	0.9781	1.0000	0.9781
Riva	0.9384	0.9016	1.0409
SSAB	0.9373	0.9091	1.0310

TABLE IV.7 – Comparison of efficiency with free EUAs as input

Firm	MLPI	MLTEC	MLTC
Tata Steel	1.3161	1.0819	1.2165
Saarstahl	1.1932	1.0599	1.1258
Moravia Steel	1.1520	1.0456	1.1017
Voestalpine	1.1352	1.0000	1.1352
Dillinger Hütte	1.1305	1.0330	1.0943
US Steel	1.1223	1.0376	1.0816
Salzgitter AG	1.1046	1.0076	1.0962
ArcelorMittal	1.0518	0.9832	1.0698
ThyssenKrupp	1.0224	0.9999	1.0225
ISD Dunafer	0.9770	1.0000	0.9770
SSAB	0.9747	0.9158	1.0643
Riva	0.9384	0.9016	1.0409

5 Conclusion

Sectors subject to international competition still benefit from free allocation of EUAs in Phase III of the EU ETS market. The iron and steel industry is one of them. In addition to account for the highest share of CO₂ emissions from the manufacturing sector, the EU iron and steel industry also appears to be very concentrated. Herein we conduct an in-depth economic analysis of the effect of the EU ETS on this sector through an original installation-level database and a Data Envelopment Analysis. We show how much free allocation generates heterogeneous overallocation profits and mostly benefits to the major steel producers. While in 2007, the leader has, for instance, captured more than 75 per cent of the overall overallocation profit, over the period from 2007-2016, it has cumulated more than twice the amount of overallocation profits of its first competitor. Hence, in this paper we highlight that by protecting the EU steelmakers from international competition, free EUAs might lead to a potential competition distortion within the EU. As a consequence, a trade-off between the EU climate policy and the competition policy arises.

Moreover, it turns out that the market leader is also the least efficient in using iron ore and coking coal (*i.e.* the main inputs to produce steel) to produce crude steel with respect to CO₂ emissions. Here we shed light on the issue related to the way permits are allocated in the iron and steel industry. The switch of methodology that occurs between Phase II and Phase III was supposed to tackle overallocation and reflect the CO₂ intensity of installations through a benchmark. However, our results show that overallocation remains and a strong heterogeneity of CO₂ intensity among steelmakers is observed. Alternative methodologies of allocation are also studied and reveal how the EUAs distribution could have been more stringent. Indeed, a relevant benchmark or an Output-Based Allocation would have exerted stronger pressure to invest in a low carbon process, especially for the less efficient installations.

Regarding the EU ETS revision for Phase 4 (2021-2030) ¹⁴, among other adjustments, the benchmark value will be decreased yearly by a coefficient ranging from 0.2 per cent to 1.6 per cent. While for all sectors the value of this coefficient will be determined according to CO₂ emissions in 2016-2017, and will be updated for 2026-2030, the benchmark value for hot metal is already set to be updated yearly by a 0.2 per cent coefficient and will be maintained over the whole period. In addition, the steelmaking industry will still be provided with free EUAs. Hence, we might wonder how the future of the EU ETS can bring optimism in its ability to address the climate change issue in an effective way, at least in regarding the steelmaking industry's CO₂ emissions.

¹⁴Directive (EU) 2018/410 amends Directive 2003/87/EC to enhance cost-effective emission reductions and low-carbon investments.

Annexes IV

IV.A Methodology of DEA : static and dynamic approaches

IV.A.1 DEA with undesirable outputs

DEA is a non parametric frontier approach that estimates efficiency among comparable entities by solving mathematical programming models (Charnes *et al.*, 1978). Based on the assumption of convexity, DEA compares actual firms to virtual firms that are the weighted combinations of actual firms. Unlike the previous CO₂ intensity ratio (or the inverse form which is the efficiency of steel production by considering CO₂ as the only one input), here we are able to incorporate multiple inputs and outputs. The outcome is known as a technical efficiency which is a score determined for each firm. The performance of the firm is analysed within a group of comparable firms and is evaluated by comparing it to a relative production combination that is achievable in practice. We consider n firms with m inputs and s outputs. Let x_{ij} be the inputs and y_{rj} be the outputs of firm j . The mathematical representation of the score would be as follows :

$$\theta_j = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (\text{IV.4})$$

where θ_j is the efficiency score of the unit j , u_r and v_i are the weights of output r and input i , y_{rj} and x_{ij} are respectively the quantities of output r and input

i observed for unit j ¹⁵. DEA has been widely used in economic literature and a large number of extensions have also emerged such as environmental performance evaluation. Regarding the latter, Scheel (2001) introduced various techniques to address the challenge of incorporating environmental externalities in DEA, while Zhou *et al.* (2008) presented a literature review of the application of DEA in environmental and energy efficiency studies. Basically, we consider that the production of any « desirable » output is accompanied by the joint production of « undesirable » output such as CO₂. To incorporate undesirable outputs in the DEA model, a Directional Distance Function (DDF) technique is used. As explained by Chung *et al.* (1997) in their article, this approach « solves the problem caused by the joint production of good and bad outputs », which is ignored in traditional DEA models.

Indeed, this allows us to deal with the asymmetric treatment of desirable and undesirable outputs (*i.e.* desirable outputs are maximised while undesirable outputs are minimised) relative to the same amount of inputs. This joint production implies to consider the nulljointness and the weak disposability conditions to the traditional DEA model assumptions. The former means that if a desirable output is produced, some undesirable outputs are generated. The latter means that a reduction of undesirable outputs would be costly, in the sense that either resource must be diverted or production must be cut back (*i.e.* reducing undesirable outputs is considered an opportunity cost).

Formally, the nulljointness condition is described such that : if $(x, y^d, y^u) \in T$ and $y^u = 0$, then $y^d = 0$. The weak disposability assumption is described such that : if $(x, y^d, y^u) \in T$ and $\theta \in [0; 1]$, then $(x, \theta y^d, \theta y^u) \in T$, where we have x , the vector of inputs, y^d the vector of desirable outputs and y^u the vector of undesirable outputs. We also define T as the reference technology that consists of all feasible combinations of inputs x , and outputs y^d and y^u . The DDF with undesirable outputs is

¹⁵For further details on the general DEA approach see *e.g.* Fare *et al.* (1994); Cooper *et al.* (2007)

defined as follows :

$$\vec{D}_j(x, y^d, y^u) = \max\{\theta : (x, y^d, y^u) + (\theta g_x, \theta g_{y^d}, \theta g_{y^u}) \in T\} \quad (\text{IV.5})$$

where the directional vector $g = (g_x, g_{y^d}, g_{y^u})$ determines the direction in which efficiency is measured, such that $g = (g_{y^d}, g_{y^u}) = (y^d, -y^u)$ measuring the most feasible increase of desirable outputs simultaneously to a proportional decrease of undesirable outputs, with respect to constant quantity of inputs (Chung *et al.* (1997); Dubrocard and Prombo (2012)). Hence the DDF becomes :

$$\vec{D}_j(x, y^d, y^u) = \max\{\theta : (x, y^d, y^u) + (\theta g_{y^d}, -\theta g_{y^u}) \in T\} \quad (\text{IV.6})$$

The value of the directional efficiency measure $\vec{D}_j$, represents the distance between observation (y^d, y^u) and a point $(y^d + \theta g_{y^d}, y^u - \theta g_{y^u})$ on the production frontier. It projects the value observed for firm j along the pre-assigned direction corresponding to the output vector $g_y = (y^d, y^u)$. Following the developments of DEA model with undesirable outputs made by Aparicio *et al.* (2015), Alvarez *et al.* (2016) defines the following programme to compute the efficiency score for each unit j :

$$\begin{aligned} \vec{D}_j(x_j, y_j^d, y_j^u) = & \max_{\theta, \lambda} \theta_j \\ & \text{subject to} \\ & X\lambda \leq x_j \\ & Y^d\lambda \geq y_j^d + \theta y_j^d \\ & Y^u\lambda \leq y_j^u - \theta y_j^u \\ & \max\{y_i^u\} \geq y_j^u - \theta y_j^u \\ & \lambda \geq 0 \end{aligned} \quad (\text{IV.7})$$

where $j = 1, 2, \dots, n$ is the observed firm, $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ and $Y = (y_1, y_2, \dots, y_s)$ are the input and output vectors of m and s dimension respectively, $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ is a semi-positive vector. Hence, considering undesirable outputs, we have $y =$

(y^d, y^u) . The optimal solution $0 \leq \theta_i \leq 1$ is computed for each firm. If $\theta_i = 0$, the firm is considered as efficient since there is no difference between the observed values and the efficient production frontier. A value of $\theta_i > 0$ shows inefficiency meaning that the estimated values $(\lambda X, \lambda Y^d, \lambda Y^u)$ outperform the observed values (x_j, y_j^d, y_j^u) .

IV.A.2 The Malmquist-Luenberger Productivity Index

Based on the previous DDF approach, Chung *et al.* (1997) developed the Malmquist Luenberger index. Unlike its static counterpart based on cross-sectional data, the non parametric Malmquist-Luenberger Productivity Index (hereafter « MLPI ») uses time-series data and also includes undesirable outputs. This index measures the change in productivity by comparing its relative efficiency with respect to reference technologies corresponding to two different time periods. Thus, we are able to dissociate efficiency change and technical change. The former is called « the catch-up effect ». It refers to the technical efficiency with respect to the two periods (hereafter « MLTEC »). The latter corresponds to a « frontier-shift effect » which is the change in the reference frontier between both periods (hereafter « MLTC »).

We consider $(x_j^t, y_j^{t,d}, y_j^{t,u})$ observed in $t = 1, 2$, while $\theta^{1,1}$ and $\theta^{2,2}$ are the efficiency scores of period one and two computed from program (IV.7). The first superscript is the time period and the second superscript is the reference technology. We also define the intertemporal score $\theta^{2,1}$ assessing the observations of period two $(x_j^2, y_j^{2,d}, y_j^{2,u})$ with respect to technology in period one $(X^1, Y^{1,d}, Y^{2,u})$.

The programme becomes :

$$\begin{aligned}
 \vec{D}_j(x_j^2, y_j^{2,d}, y_j^{2,u}) = & \max_{\theta, \lambda} \theta_j^{2,1} \\
 & \text{subject to} \\
 & X^1 \lambda \leq x_j^2 \\
 & Y^{1,d} \lambda \geq y_j^{2,d} + \theta y_j^{2,d} \\
 & Y^{1,u} \lambda \leq y_j^{2,u} - \theta y_j^{2,u} \\
 & \max\{y_i^{t,u}\} \geq y_j^{2,u} - \theta y_j^{2,u} \\
 & \lambda \geq 0
 \end{aligned} \tag{IV.8}$$

An equivalent program is used to compute $\theta^{1,2}$ so that given a sequence of two years, we can define the MLPI as ¹⁶ :

$$MLPI = \overbrace{(1 + \theta^{1,1}/1 + \theta^{2,2})}^{MLTEC} \times \underbrace{(1 + \theta^{2,2}/1 + \theta^{2,1}) \times (1 + \theta^{1,2}/1 + \theta^{1,1})}_{MLTC}^{\frac{1}{2}}$$

where the first component is the change in technical efficiency and the second is the technical change. If $MLPI > 1$, the unit is able to produce more desirable output with less undesirable output, while $MLPI = 1$ means the productivity remains unchanged, and $MLPI < 1$ captures a productivity decline.

¹⁶For further details see Alvarez *et al.* (2016)

IV.B DEA results

Thanks to the linear model defined in (IV.7) and based on our cross sectional data, we can compute the relative CO₂ emission efficiency score. Results are given in the following Table :

TABLE IV.8 – The static CO₂ emission performance scores of the steelmaking firms (2007-2015)

Firm	Average	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Voestalpine	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ISD Dunafer	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.030	0.000
Salzgitter AG	0.031	0.000	0.013	0.068	0.047	0.029	0.044	0.025	0.009	0.042
Moravia Steel	0.037	0.000	0.000	0.000	0.078	0.086	0.061	0.037	0.000	0.068
SSAB	0.073	0.022	0.077	0.000	0.000	0.088	0.104	0.090	0.057	0.218
US Steel	0.081	0.090	0.136	0.052	0.022	0.117	0.113	0.000	0.065	0.131
Tata Steel	0.089	0.000	0.084	0.000	0.155	0.274	0.041	0.185	0.013	0.052
ThyssenKrupp	0.090	0.076	0.054	0.115	0.083	0.096	0.131	0.088	0.112	0.056
Riva	0.101	0.021	0.121	0.047	0.007	0.134	0.100	0.201	0.114	0.166
Dillinger Hütte	0.116	0.187	0.132	0.069	0.080	0.082	0.156	0.111	0.083	0.148
Saarstahl	0.119	0.119	0.130	0.211	0.096	0.106	0.171	0.078	0.069	0.087
ArcelorMittal	0.128	0.154	0.239	0.032	0.094	0.084	0.127	0.129	0.116	0.179

Conclusion générale

1 Contributions de la thèse

Ce travail de thèse a pour objet l'étude des interactions entre des entreprises minières en situation d'oligopole et une frange de recycleurs concurrentiels. Nous nous concentrons sur les matières premières métalliques et les enjeux sont importants. Portée par une urbanisation croissante et des besoins grandissants en termes d'infrastructures et d'équipements industriels, la demande des pays émergents, notamment en matières premières minérales de base, reste forte et devrait le demeurer pour les prochaines années. En parallèle, la transition écologique et l'économie numérique en œuvre dans de nombreux pays industrialisés stimulent une demande pour des matières premières dites « stratégiques ». Au-delà des enjeux liés à la disponibilité de ces deux types de ressources, leur extraction, et même leur transformation, génère des dommages environnementaux conséquents, alors que des substituts existent : les matières premières secondaires.

Alors que le travail théorique de cette thèse permet d'appliquer la problématique de la concurrence entre entreprises minières et recycleurs pour différentes matières, nous privilégions les marchés du minerai de fer et de l'acier pour donner une dimension empirique à notre analyse. Au-delà d'un accès aux données plus simplifié pour cette matière que pour d'autres, le recyclage est relativement bien développé dans la plupart des pays grâce à une technologie simple et un gisement existant. La concurrence avec les entreprises minières est donc possible, bien que des différences subsistent parmi les principaux pays consommateurs d'acier. De plus, la structure

de marché de l'activité d'extraction est reconnue pour être oligopolistique, où trois à quatre firmes sont dominantes. Et pourtant...

Dans le cadre du chapitre 1, l'étude du marché du minerai de fer et de l'acier n'a pas seulement mis en évidence l'existence de cet oligopole, mais en tenant compte des caractéristiques de la demande de ces dernières années, c'est un monopsonne contrarié qui semble, *in fine*, être en place. Quasi inexistante dans la littérature académique, cette structure de marché découle du choc de demande de minerai de fer au début des années 2000. Après plusieurs années de bouleversements sur le marché, notamment marquées par le changement de mode de fixation du prix du minerai, la demande s'est finalement concentrée autour d'un seul acteur : le pouvoir central chinois. Représentant plus de 50% de la production sidérurgique et surtout plus de 65% des importations en minerai (en volume), la Chine s'est installée comme l'acteur unique à l'origine des variations des conditions de marché, et notamment du prix du minerai de fer, face à un faible nombre d'offres.

En raison du manque de recul théorique et empirique sur les implications de ce changement, l'hypothèse d'une demande où aucun acteur n'a d'emprise sur le prix de marché est maintenue. En ce recentrant sur l'amont de la filière, nous montrons dans le cadre du chapitre 2 dans quelle mesure les recycleurs peuvent entrer sur le marché. L'atteinte d'un seuil technologique apparaît alors comme condition *sine qua non* pour que les recycleurs puissent venir concurrencer les entreprises minières. Plus le secteur de l'extraction est concurrentiel et le coût marginal faible, plus la technologie devra être importante afin de pallier les difficultés à entrer sur le marché de l'approvisionnement en matières premières.

Sur la base de l'affaire Alcoa, une littérature étudiant l'effet du recyclage sur le prix, le pouvoir de marché d'un monopole et/ou sur le rythme d'extraction de la matière première, s'est développée (*e.g.* Gaskins (1974) ; Swan (1980) ; Martin (1982) ; Grant (1999) ; Gaudet and Van Long (2003) ; Ba and Mahenc (2018)). Plusieurs hypothèses de concurrence et types de modèle ont été pris en compte mais jamais, la structure de marché de l'extraction ne fut considérée comme oli-

gopolistique. Nous formalisons donc cette concurrence dans le cadre d'un modèle Cournot-Stackelberg et nous montrons qu'un secteur minier plus concurrentiel permet aux firmes de maintenir voire d'améliorer leur part de marché vis-à-vis des recycleurs, et ce, malgré une hausse en parallèle des quantités de matières premières secondaires produites. Le prix plus faible qui découle d'une structure plus concurrentielle et qui désincite les recycleurs à améliorer leur taux de recyclage, est ainsi compensé par la plus grande quantité de déchets disponibles. Si l'effet global pour les entreprises minières en termes de parts de marché est positif, le risque est qu'un plus grand nombre de firmes rende non seulement plus difficile la mise en place de potentielles stratégies, mais également fasse diminuer leur pouvoir de marché vis-à-vis des industriels en aval. Nous mettons en lumière l'existence d'un seuil minimum de technologie dont les recycleurs doivent bénéficier afin de pouvoir entrer sur le marché et concurrencer les entreprises minières. Ainsi, la technologie doit être d'autant plus efficace si le marché de l'extraction est concurrentiel, alors que le seuil est d'autant plus faible lorsque le coût de l'extraction est élevé.

Nous montrons également dans quelle mesure la concurrence entre les deux offreurs et la rente minière sont affectées par la technologie de recyclage et par la proportion de produits finis qui devient déchets (*i.e.* les produits à faible durée de vie). Ces deux paramètres captent l'aptitude des recycleurs à limiter les fuites de matières qui se produisent au niveau de la collecte du déchet et du processus de recyclage. Ainsi, nous montrons que la domination des recycleurs en termes de parts de marché, ne peut s'entrevoir qu'avec l'existence simultanée d'une technologie de recyclage efficace et d'un système de collecte performant. A cet égard, toute politique publique visant à limiter l'une ou l'autre de ces fuites de matières s'avère bénéfique pour les recycleurs. De la même manière, nous mettons en exergue dans ce chapitre une diminution de la rente minière lorsque les deux paramètres susmentionnés, et définissant la compétitivité du secteur secondaire, sont réunis. Si la technologie de recyclage n'est pas suffisamment élevée, la présence d'un secteur secondaire dans l'offre de matières premières peut ne pas avoir d'effets sur

la rente minière, voir même l'augmenter. Cette dernière possibilité est évoquée dans la littérature mais uniquement à l'aune d'une potentielle stratégie de la firme minière.

Dans le chapitre 3, nous étendons l'analyse de cette concurrence en considérant le différentiel d'externalités environnementales qui existe entre l'extraction minière et le recyclage, tout en incluant les potentiels dommages générés en aval du fait de l'utilisation de la matière vierge ou secondaire par les industriels. La prise en compte de ces externalités permet d'analyser de manière plus précise l'effet du recyclage sur le bien-être car la littérature existante n'appréhendait ce dernier que sous le prisme de l'évolution du pouvoir de marché des entreprises minières. Ainsi, il s'avère que l'apparition du recyclage, même dans de faibles proportions, améliore le bien-être social. L'effet de l'augmentation des quantités générées (*i.e.* en termes de revenus et de surplus des consommateurs) compensent le fait que celles-ci soient produites à un coût supérieur à celui des entreprises minières. En parallèle, le recyclage permet de diminuer les externalités environnementales associées à l'offre de matières premières. Les enjeux liés au développement de cette filière sont donc d'autant plus forts si les dommages générés par la production de matières vierges sont élevés. Au delà des émissions de CO₂ qui s'avèrent *a priori* limitées dans le processus d'extraction, le recours à d'autres polluants ainsi que les dommages sur l'eau et les sols sont importants. En revanche, ils restent difficiles à évaluer pour certaines matières premières minérales, en particulier stratégiques.

Dans ce contexte où une double distorsion de marché apparaît (*i.e.* externalité environnementales et pouvoir de marché des entreprises minières), nous analysons les effets d'une taxe environnementale sur l'activité minière ainsi qu'une subvention attribuée aux recycleurs. Ces deux politiques n'ont certes pas le même objectif initial, mais affectent toutes deux la répartition des parts de marché entre entreprises minières et recycleurs, les externalités associées et le bien-être. La comparaison des deux instruments nous indique les limites de l'application d'une taxe environnementale, non seulement au regard de son efficacité face aux deux distorsions, mais

aussi compte tenu des potentielles difficultés liées à sa mise en œuvre. Si à très court terme la hausse du prix serait incitative pour les recycleurs, ils pourraient pâtir, à moyen et/ou long terme (*i.e.* en fonction de la durée de vie des produits et de la répartition de la matière dans les secteurs de consommation) de la diminution des quantités extraites, et donc du stock de déchets. Cet effet indirect de la taxe est encore plus dommageable lorsque le recyclage est peu développé et le stock de déchets déjà limité. À l'inverse la subvention, en permettant aux recycleurs d'être plus compétitifs face aux mineurs, diminue le pouvoir de marché des entreprises minières et favorise, indirectement, la réduction des externalités environnementales associées à l'offre de matières premières. Bien que potentiellement coûteuse, sa mise en œuvre est relativement simple car elle peut prendre plusieurs formes à l'échelle locale comme à l'échelle globale.

En appliquant notre modèle au marché du minerai de fer et de l'acier, nous confirmons les différences significatives entre la taxe et la subvention dans le cadre d'une concurrence entre un oligopole de mineurs et une frange concurrentielle de recycleurs. Même à un niveau relativement élevé, la première n'a quasiment aucun effet sur la répartition des parts de marché. Elle fait diminuer les quantités extraites, mais dès lors, renforce la contrainte de stock pour les recycleurs. En dépit d'une diminution (attendue) des quantités de CO₂, ayant un effet positif sur le bien-être, cette politique ne permet pas aux recycleurs de compenser la diminution des quantités produites par la firme minière, et s'avère *in fine* négative pour le bien-être. À l'inverse, attribuer une subvention aux recycleurs sous forme d'appui financier à la collecte du gisement par exemple, améliore sensiblement les parts de marché de ces derniers. Indirectement (*i.e.* car ce n'est pas l'objet principal de la subvention), nous assistons également à une diminution des émissions de CO₂.

En revanche, au delà des différentes hypothèses d'estimation des paramètres et en particulier de la difficulté d'estimer la dynamique d'accumulation du stock de déchets, au moins deux limites subsistent. Tout d'abord, nous ne nous penchons pas sur le coût financier que l'instauration de ce type de subvention peut avoir pour les finances publiques. Puis, nous ne tenons pas compte de l'inertie de l'outil

productif des industriels, c'est-à-dire de leur aptitude à changer de technologie en vue de consommer la matière première secondaire à la place de la matière vierge. En effet, concernant le secteur du fer et de l'acier, les investissements consentis pour un site sidérurgique intégré sont très importants. Le poids de l'implantation historique, avec un bassin d'emploi dont la main d'œuvre est exclusivement formée sur un seul procédé, est également significatif. Puis enfin, la nécessité de recréer une filière d'approvisionnement limite l'intérêt pour un sidérurgiste de changer structurellement de technologie.

Ainsi, nous nous sommes intéressés dans le chapitre 4 à une politique publique majeure de l'Union Européenne et qui peut exercer une influence sur le changement de procédé des sidérurgistes : le marché des quotas de CO₂. Une littérature relativement dense existe en raison des nombreuses alternatives possibles pour la mise en place de ce type de politique. L'étendue du système EU-ETS sur l'industrie européenne est importante et permet également des analyses *ex-post* sur son efficacité en considérant plusieurs secteurs. Dans ce chapitre nous privilégions une analyse intra-sectorielle dans la mesure où des différences de traitement subsistent entre les secteurs (*e.g.* gratuité des permis, niveau de benchmark) et que les enjeux au regard de leurs émissions de CO₂ divergent. A cet effet, la base de données que nous avons construite recoupe plusieurs sources et rassemble les informations au niveau du site de production et de la firme (*e.g.* quantités d'acier brut produites, émissions de CO₂, quotas, consommation de minerai de fer et de charbon à coke).

Le premier constat confirme l'inefficacité du marché carbone dans son objectif de diminution des émissions de CO₂. Ainsi, l'incitation à la diminution des externalités à travers une meilleure efficacité énergétique ou un recours aux matières premières secondaires, est extrêmement faible. Ceci, comme la littérature l'a déjà montré, en raison d'une méthode d'allocation des quotas très généreuse (*e.g.* Demailly and Quirion (2008); Sandbag (2011); Chan *et al.* (2013)). En réajustant l'allocation de la Phase III avec des méthodes alternatives, nous montrons dans quelle mesure le système EU-ETS aurait pu être plus contraignant pour

les bénéficiaires de permis gratuits, et notamment ceux dont l'intensité CO₂ est la plus forte.

Dans un contexte où la sidérurgie européenne est dominée par un leader qui représente environ 35% de la production, nous montrons également comment la politique phare de l'Union Européenne pour contrôler les émissions de CO₂ interfère avec sa politique de concurrence. En effet, alors que l'attribution de quotas gratuits dans ce secteur répond à une nécessité de se prémunir contre la forte concurrence internationale, en bénéficiant essentiellement aux leaders du marché elle va à l'encontre du principe de concurrence libre et non faussée qui prévaut au sein du marché commun.

Plus surprenant encore, nous montrons à travers une analyse DEA que le leader du marché, ArcelorMittal, est la firme la moins efficace dans la consommation de matières premières par rapport à la quantité d'acier produite et aux émissions de CO₂ générées. A l'inverse, la firme qui semble être la plus efficace est dans le même temps celle qui aurait été la moins avantagée dans l'attribution des quotas gratuits depuis 2007.

Au final, ce travail de thèse montre les difficultés auxquelles sont confrontées les recycleurs pour concurrencer les entreprises minières dans l'approvisionnement en matières premières. En plus de ne pas être libre en raison du contrôle exercé par ces entreprises (*i.e.* un contrôle indirect à court terme *via* le prix de marché et un contrôle direct mais à plus long terme *via* le stock de déchets), c'est une concurrence faussée car non seulement la structure de marché est concentrée mais les coûts d'extraction ne reflètent en rien les dommages environnementaux causés. Cette concurrence non libre et faussée est préjudiciable à bien des égards et les politiques publiques sont, en plus d'être nécessaires, indispensables afin de favoriser le passage d'une économie linéaire à une économie circulaire. Ce constat est bien entendu à nuancer selon les pays et les matières considérées. A cet effet, plusieurs pistes de futures recherches potentielles émergent.

2 Perspectives de recherche

Le cadre de concurrence sur lequel notre modèle théorique s'est appuyé a mis en exergue les interactions entre les recycleurs et les entreprises minières, mais n'a en revanche pas intégré les industriels en charge de la transformation de la matière première. Ce choix de simplification nous amène à ignorer le contexte de la demande, qui, comme on l'a vu au cours du chapitre 1, peut évoluer rapidement et se concentrer. Une réflexion plus poussée pourrait donc s'avérer intéressante si ce type de structure s'avère stable dans le temps et concerne d'autres matières premières que le minerai de fer. Plus important encore serait l'intégration du secteur industriel dans un modèle théorique plus étendu. En effet, le travail réalisé dans le chapitre 4 est non seulement empirique, mais est surtout une analyse *ex-post* qui ne permet pas d'étudier l'effet d'une meilleure efficacité du marché carbone sur le secteur du recyclage. En l'occurrence, l'objectif du législateur est uniquement d'internaliser les émissions de CO₂ des industriels européens. Or, la production d'un bien étant faite, soit à partir de matières vierges soit à partir de matières secondaires, il pourrait ainsi être intéressant de modéliser des politiques publiques de type réglementaires (*e.g.* contenu minimum de matières secondaires dans le semi-produit ou le produit fini) ou économiques (*e.g.* taxe sur l'utilisation de la matière vierge), visant à encourager l'utilisation de ces dernières. Ce type de travail axé sur la demande pourrait être comparé avec nos résultats axés sur l'offre, en termes, par exemple, de parts de marché et d'émissions de CO₂. Par ailleurs, la filière secondaire peut également être stimulée encore plus en aval, au niveau des détenteurs du déchet et de leur aptitude à trier et/ou à privilégier la voix du recyclage plutôt que celles de l'enfouissement et de l'incinération. Le régulateur pourrait ainsi agir à plusieurs niveaux de la chaîne de valeur (*c.f.* Figure 2) pour encourager la filière de recyclage, et dispose d'outils qu'il pourrait être intéressant d'analyser et de comparer.

Sur le plan empirique, il est important de noter que ce type de travail pourrait produire des résultats significativement différents selon les pays et les matières

considérés. Le niveau de maturité économique a un rôle important sur la composition des flux de déchets et donc, sur le type de recyclage (*i.e.* le choix de la matière) ainsi que sur le niveau de développement de cette activité. En effet, notre cadre de travail s'est ici limité aux marchés du fer et de l'acier. Non seulement un approfondissement pays par pays concernant cette matière serait nécessaire, en particulier dans l'estimation de la demande et des quantités de ferrailles disponibles, mais un travail de recherche sur une autre matière première comme le cobalt, pourrait également s'avérer pertinent. Les enjeux sont multiples. Tout d'abord le cobalt est considéré comme une matière critique par l'Union Européenne (Commission Européenne, 2017). Il relève d'une importance économique majeure alors que l'approvisionnement est jugé « à risque ». Les réserves estimées à environ 3.4 millions de tonnes se trouvent pour moitié en République Démocratique du Congo, qui produit 64% de la demande mondiale. Le recours important aux mines artisanales participent à rendre la filière d'approvisionnement instable. Les conditions d'extraction, et en particulier l'usage important de produits chimiques, sont difficiles à évaluer. Pour ces raisons, le développement d'une filière de recyclage du cobalt qui se substituerait à la matière vierge s'avère importante. Dès lors, un travail de recherche sur des outils réglementaires et/ou économiques efficaces serait nécessaire.

Enfin, à l'instar des débats et des travaux sur la transition énergétique et bien qu'il n'a pas été évoqué tout au long de cette thèse, le contenu en emploi de l'activité de recyclage en comparaison d'une activité d'extraction pourrait faire l'objet d'un futur travail de recherche. Plus généralement, l'intégration des activités de réemploi et de réparation pourrait mettre en relief les effets de l'économie circulaire sur l'emploi.

Bibliographie

- Aatola P., Ollikainen M. and Toppinen A. 2013. Price discrimination in the EU-ETS market : Theory and econometric analysis with market fundamentals, 36, 380-395.
- Abrell J., Ndoye FA. and Zachmann G., 2011. Assessing the impact of the EU-ETS using firm-level data. Working Paper, Bruegel.
- Alexeeva-Talebl V., 2011. Cost pass-through of the EU emission allowances : Examining petroleum markets. *Energy Economics*, 33, S75-S83.
- Alvarez IC., Barbero J. and Zofio JL., 2016. A Data Envelopment Analysis toolbox for Matlab. Working Paper, Universidad Autonoma de Madrid.
- Amigues JP., Van Long N. and Moreaux M., 2006. Ressources naturelles, impatience et progrès technique. *Revue Economique*, 57, 185-218.
- Andersen J. and Hyman B., 2015. Energy and material flow models for the US steel industry. *Energy*, 26, 137-159.
- Anderson B. and Di Maria C., 2011. Abatement and allocation in the pilot phase of the EU-ETS. *Environmental and Resource Economics*, 48, 83-103.
- Andre FJ. and Cerda E., 2006. On the dynamics of recycling and natural resources. *Environmental and Resource Economics*, 33, 199-221.
- Aparicio J., Pastor JT. and Zofio JL., 2015. How to properly decompose economic efficiency using technical and allocative criteria with non-homothetic DEA technologies. *European Journal of Operational Research*, 240, 882-891.

- Ayres RU., 1997. Metals recycling : Economic and Environmental implications. Working Paper, INSEAD.
- Ba BS., 2017. Recycling of a primary resource and market power : The Alcoa case. Working Paper, FAERE.
- Ba BS. and Mahenc P., 2018. Is recycling a threat or an opportunity for the extractor of an exhaustible resource. *Environmental and Resource Economics*.
- Barnett DF. and Crandall RW., 1986. Up from the ashes : The rise of the steel minimill in the US. The Brookings Institution.
- Barnett HJ. and Morse C., 1963. Scarcity and growth : The economics of natural resource activity. Baltimore, Johns Hopkins University Press.
- Baurens S., 2010. Valuation of metals and mining companies. Basinvest and University of Zurich.
- Betz R., Rogge K. and Schleich J., 2006. EU emissions trading : An early analysis of national allocation plans for 2008-2012. *Climate Policy*, 6, 361-394.
- Bureau of International Recycling (Ferrous Division), 2016. World steel recycling in figures. Reports from 2010, 2012 and 2016. Brussels.
- Blas J., 2010. Annual iron ore contract system collapses. *Financial Times*.
- Blomberg J. and Soderholm P., 2009. The economics of secondary aluminium supply : An econometric analysis based on European data. *Resources, Conservation and Recycling*, 53, 455-463.
- BOC International, 2012. The end usage of steel in 2010.
- Boston Consulting Group., 2007. Beyond the bloom : The outlook of global steel.
- Artignan D. and Cottard F., 2003. Elements à prendre en compte pour l'évaluation des impacts environnementaux dans l'élaboration d'un Plan de Prévention des Risques Miniers (PPRM). Rapport BRGM/RP-52049-FR.

- Bradford CA., 1980. Steel industry quaterly review. Merrill Lynch.
- Branger F., 2015. EUTL steel dataset.
- Branger F., Ponssard JP., Sartor O. and Misato S., 2015. EU ETS, free allocations, and activity level thresholds : the devil lies in the details. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 2, 401-437.
- Buchanan J., 1969. External Diseconomies, corrective taxes and market structure. *American Economic Review*, 59, 174-177.
- Calcott P. and Walls M., 2000. Policies to encourage recycling and design for environment : What to do when markets are missing ?. Discussion Paper, Resources for the Future, 00-30.
- Calvo G., Mudd G., Valero A. and Valero A., 2015. Decreasing ore grades in global metallic mining : A theoretical issue or a global reality. *The RAND Journal of Economics*, 46, 461-479.
- Carlsen EH., 1980. Aluminium recycling coefficients. *Business Economics*, 15, 41-46.
- Carlton DW. and Perloff JM, 2008. *Economie Industrielle*. De Boeck.
- CEPII., 1982. *La sidérurgie : Une industrie en déclin ?*.
- Chalmin P., 2015. *Cyclope 2015 : Les marchés mondiaux*. Economica.
- Chan HS., Shanjun L. and Fan Z., 2013. Firm competitiveness and the EU-ETS. *Energy Policy*, 63, 1056-1064.
- Changfu Z., 2012. The role of the iron and steel industry in China's future economic development. LCA and Steel Seminar.
- Charnes A., Cooper WW. and Rhodes E., 1978. Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2, 429-444.

- Chung YH., Fre R. and Grosskopf S., 1997. Productivity and undesirable outputs : A directional distance function approach. *Journal of Environmental Management*, 51, 229-240.
- Coase R., 1937. The nature of the firm. *Economica*.
- Colombier M. and Neuhoff K., 2007. Can sectoral agreements and Output-Based Allocation adress leakage. Working Paper, University of Cambridge.
- Commission Européenne, 2001. Commission clears merger between Brazilian iron ore producers subject to undertakings.
- Study on the review of the list of Critical Raw Materials. EU publications.
- Cooper DR., Skelton A., Moynihan M. and Allwood J., 2014. Component level strategies for exploiting the lifespan of steel in products. *Resources, Conservation and Recycling*, 84, 24-34.
- Cooper WW., Seiford LM. and Tone K., 2007. *Data Envelopment Analysis : A comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software*. Princeton University Press.
- Crandall RW., 1981. The US steel industry in recurrent crisis : Policy option in a competitive world. The Brookings Institution.
- Crandall RW., 1996. From competitiveness to competition, the threat of minimills to large national steel companies. *Resources Policy*, 22, 107-118.
- Creti A., Jouvét PA. and Mignon V., 2012. Carbon price drivers : Phase I *vs* Phase II equilibrium. *Energy Economics*, 34, 327-334.
- Crompton P., 2000. Future trends in Japanese steel consumption. *Resources Policy*, 26, 103-114.
- Crompton P., 2015. Explaining variation in steel consumption in the OECD. *Resources Policy*, 45, 239-246.

- Damigos D. and Kaliampakos D., 2003. Environmental economics and the mining industry : Monetary benefits of an abandoned quarry rehabilitation in Greece. *Environmental Geology*, 44, 356-362.
- David M., 2007. Politique environnementale et politique de la concurrence. *Economie et Prévision*, 2, 125-138.
- David M. and Sinclair-Desgagné B., 2010. Pollution abatement subsidies and the eco-industry. *Environmental and Resource Economics*, 45, 271-282.
- De Beir J., 2002. Ressources environnementales et politiques d'incitation au recyclage. Thèse, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 33-34.
- De Beir J., Fodha M., Girmens G., 2007. Recyclage et externalités environnementales : Faut il subventionner les activités de récupération/recyclage ?. *Revue Economique*, 58, 609-617.
- De Beir J. and Girmens G., 2009. Alcoa re-revisited : Recycling market power and environmental policy. *International Economics/Economie Internationale*, 120, 39-52.
- De Meideros OR., 2006. The economics of the world iron and steel industry : 1950-1980. Social Science Research Network.
- Dechezlepretre A., Gennaioli C., Martin R. and Mulls M., 2014. Searching for carbon leaks in multinational companies. Working Paper, Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment.
- Deloitte CIS Research Centre, 2018. Overview of the steel and iron ore market. Moscow
- Demailly D. and Quirion P., 2008. EU-ETS and competitiveness : A case study on the iron and steel industry. *Energy Economics*, 30, 2009-2027.
- Denham EW., 1983. World steel in the 1980's : A case of survival. *Journal of Forecasting*, 3, 465-466.

- Dinan TM., 1993. Economic efficiency effects of alternative policies for reducing waste disposal. *Journal of Environmental Economics and Management*, 25, 242-256.
- Du J., 2012. Iron ore trade platform will improve price transparency. *China Daily*.
- Dubrocard A. and Prombo M., 2012. Performance Environnementale et mesure de la productivité. Working Paper, Munich Personal RePEc Archive.
- Duke RM., Johnson RL., Mueller H., Qualls PD., Roush CT. and Tarr DG., 1977. The US steel industry and its international rivals : Trends and factors determining international competitiveness. Bureau of Economics to the Federal Trade Commission.
- Dussaux D. and Glachant M., 2018. How much does recycling reduce imports ? Evidence from metallic raw materials. *Journal of Environmental Economics and Policy*.
- Ebert U., 1992. Pigovian taxes and market structure : The case of oligopoly and different abatement technologies. *Public Finance Analysis*, 2, 154-166.
- Ecofys, 2009. Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU-ETS post 2012 : Sector report for the iron and steel industry.
- Edwards R. and Pearce D., 1978. The effect of prices on recycling of waste materials. *Resources Policy*, 4, 242-248.
- Egenhofer C., Alessi M., Fujiwara N. and Georgiev A., 2011. The EU-ETS and climate policy towards 2050 : Real incentives to reduce emissions and drive innovation ?. CEPS Special Report.
- Ellerman AD. and Bunchner BK., 2008. Over-allocation or abatement ? A preliminary analysis of the EU-ETS based on the 2005-2006 emissions data. *Environmental and Resource Economics*, 41, 267-287.

- Ellerman AD., Convery F.J. and De Perthuis C., 2010. Pricing carbon : The EU-ETS. Cambridge University Press.
- Eluierd R., 1993. Les mots du fer et des Lumières : Contribution à l'étude du vocabulaire de la sidérurgie française (1722-1812). Paris, H. Champion.
- Emery A., Williams KP. and Griffiths AJ., 2002. A review of the metals recycling industry. *Waste Management Recycling*, 20, 457-467.
- Encaoua D. and Jacquemin A., 1978. Indices de concentration et pouvoir de monopole. *Revue Economique*, 29, 514-537.
- Economic Research Institute, 2017. Iron ore market study. Data from Wood and MackKenzie (2014)).
- Ericsson M., 2001. Mining mergers and acquisitions reaches record levels in 2001.
- Ericsson M., 2007. Mergers and acquisitions
- Eurofer : The European Steel Association, 2016. European Steel in Figures : 2017 Edition (covering 2012-2016). Brussels.
- Fabra N. and Reguant M., 2014. Pass-through of emissions costs in electricity markets. *American Economic Review*, 104, 2872-2899.
- Fabra R., Grosskopf S., Norris M. and Zhang Z. 1994. Productivity growth, technical progress and efficiency change in industrialized countries. *American Economic Review*, 84, 66-83.
- Faure P., 2012. La filière acier en France et l'avenir du site de Florange. Report for the French Ministry for the Economy and Finance.
- Federec, 2012. Recyclage des ferrailles : Dans la tourmente sidérurgique. Presentation for the Pollutec event, November 2012.
- Feng L., 1995. China's steel industry : Its rapid expansion and influence on the international steel industry. *Resources Policy*, 20, 219-234.

- Figuerola-Ferretti I. and Gilbert CL., 2001. Price variability and marketing method in non-ferrous metals : Slade's analysis revisited. Working Paper, Queen Mary University of London.
- Fischer C., 2001. Rebating environmental policy revenues : Output-Based Allocation and Tradable performance standards. Discussion Paper, Resources for the Future.
- Fisher BS., Beare S., Matysek AL. and Fisher AM., 2015. The impacts of potential iron ore supply restrictions on producer country welfare. Working Paper, BAEconomics Australia.
- Forsund FR., 2008. Good modeling of bad outputs : pollution and multiple-output production. Working Paper, Oslo University.
- Fre R., Grosskopf S., Norris M. and Zhang Z., 1994. Productivity growth, technical progress and efficiency change in industrialized countries. *American Economic Review*, 84, 66-83.
- Fullerton D. and Kinnaman T., 1995. Garbage, recycling and illicit burning or dumping. *Journal of Environmental Economics and Management*, 29, 78-91.
- Gale J. and Freund P., 2000. Greenhouse Gas Abatement in Energy Intensive Industries. 5th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT5), Cairns, Australia.
- Gao X. and Wang A., 2010. The prediction of China's steel demand based on S-shaped regularity. Research Center for Strategy of Global Mineral Resources.
- Gaskins DW. , 1974. Alcoa revisited : The welfare implications of a secondhand market. *Journal of Economic Theory*, 7, 254-271.
- Gaudet G., Moreaux M. and Salant SW., 2001. Intertemporal depletion of resource sites by spatially distributed users. *American Economic Review*, 91, 149-159.

- Gaudet G. and Van Long N., 2003. Recycling redux : A Nash-Cournot approach. *The Japanese Economic Review*, 54, 409-419.
- Gaudet G., 2007. Natural resource economics under the rule of Hotelling. *Canadian Journal of Economics*, 40, 1033-1059.
- Germeshausen R., Panke T. and Wetzel H., 2015. Investigating the influence of firm characteristics on the ability to exercise market power. Discussion Paper, Centre for European Economics Research.
- German Federal Ministry for Economic Affairs and OECD, 2017. Global Forum on Steel Excess Capacity : Report.
- Grace R., Turner RK. and Walter I., 1978. Secondary materials and international trade. *Journal of Environmental Economics and Management*, 5, 172-186.
- Grosse F., 2010. Is recycling part of the solution ? The role recycling in an expanding society and a world of finite resources. *Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society*.
- Grant D., 1999. Recycling and market power : A more general model and re-evaluation of the evidence. *International Journal of Industrial Organization*, 17, 59-80.
- Gray LC., 1914. Rent under the assumptions of exhaustibility. *Quarterly Journal of Economics*, 28, 466-489.
- Guimaraes da Silva M., Costa Muniz AR., Hoffmann R. and Luz Lisboa AC., 2018. Impact of greenhouse gases on surface coal mining in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 193, 206-216.
- Gunson AJ., Klein B., Veiga M. and Dunbar S., 2012. Reducing mine water requirements. *Journal of Cleaner Production*, 21, 71-82.

- Hasanbeigi A., Arens M., Rojas-Cardenas J., Price L. and Triolo R., 2016. Comparison of carbon dioxide emissions intensity of steel production in China, Germany, Mexico and the United States. *Resources, Conservation and Recycling*, 113, 127-139.
- Hellmer S. and Ekstand J., 2012. The iron ore world market in the early twenty-first century : The impact of the increasing Chinese dominance. *Mineral Economics*, 25, 89-95.
- Henry-Wittmann MV., 1996. Le recyclage des déchets : approche économique d'une activité nouvelle. *Revue Française d'économie*, 11, 165-191.
- Herfindhal OC., 1967. Depletion and economic theory. *Extractive Resources and Taxation*, University of Wisconsin Press.
- Hintermann B., 2010. Allowances price drivers in the first phase of the EU-ETS. *Journal of Environmental Economics and Management*, 59, 43-56.
- Hoel M., 1978. Resource extraction and recycling with environmental costs. *Journal of Environmental Economics and Management*, 5, 220-235.
- Hoel M., 1978. Resource extraction, substitute production, and monopoly. *Journal of Economic Theory*, 19, 28-37.
- Hollander A. and Lasserre P., 1988. Monopoly and pre-emption of competitive recycling. *International Journal of Industrial Organization*, 6, 489-497.
- Hotelling H., 1931. The economics of exhaustible resources. *Journal of Political Economics*, 39, 137-175.
- Hurst L., 2015. Assessing the competitiveness of the supply side response to China's iron ore demand shock. *Resources Policy*, 45, 247-254.
- International Energy Agency, 2007. Tracking industrial energy efficiency and CO2 emissions.

- IPCC., 2006. Guidelines for national greenhouse gas inventories. 3, 4.1-4.85.
- Iwata G., 1974. Measurement of conjectural variations in oligopoly. *Econometrica*, 42, 947-966.
- Jacobs J., 1970. *The econonmy of cities*. New York, Random House.
- Jain RK., 2016. Environmental impacts of mining and mineral processing. *Management, Monitoring and Auditing Strategies*, 4, 53-157.
- Jaraite J. and Di Maria C., 2016. Did the EU-ETS make a difference ? An empirical assessment using Lithuanian firm-level data. *The Energy Journal*, 37, 1-23.
- Jones A., 1986. Prospects for an iron ore cartel. *Resources Policy*, 12, 103-115.
- Jefferson GH., 1990. China's iron and steel industry : Sources of enterprise efficiency and the impact of reform. *Journal of Development Economics*, 33, 329-355.
- Katsoulacos Y. and Xepapadeas A., 1996. Emission taxes and market structure. *Environmental Policy and Market Structure, Economics, Energy and Environment* 4, 3-22.
- Kemp MC. and Van Long N., 2014. Towards a more general theory of the order of exploitation of non-renewable resource-deposits. *Contributions to Economic Analysis*, 150, 39-74.
- Kennedy P., 1987. *The rise and fall of the great powers*. Random House.
- Kesler SE. and Simon AC., 2015. *Mineral Resources, Economics and the Environment*. Cambridge University Press.
- Kim Y. and Worell E., 2002. International comparison of CO2 emission trends in the iron and steel industry. *Energy Policy*, 10, 827-838.
- Kim JW., Lee JY., Kim JY. and Lee HK., 2006. Sources of productive efficiency : International comparison of iron and steel firms. *Resources Policy*, 31, 239-246.

- Kinnaman T., Shinkuma T. and Yamamoto M., 2015. The socially optimal recycling rate : Evidence from Japan. *Journal of Environmental Economics and Management*, 68, 54-70.
- Koch N., Fuss S., Grosjean G. and Edenhofer O., 2014. Causes of the EU-ETS price drop : recession, CDM, renewable policies or a bit of everything? New evidences. *Energy Policy*, 73, 676-685.
- Koutassila JP., 1998. Le syndrome hollandais : théorie et vérification empirique au Congo et au Cameroun. Document de travail, Université de Bordeaux.
- Krutilla JV., 1967. Conservation reconsidered. *American Economic Review*, 57, 777-786.
- Kuan C., Hongchang W., Yuxin Z., Jefferson GH. and Rawski TG., 1988. Productivity change in Chinese industry : 1953-1985. *Journal of Comparative Economics*, 12, 570-591.
- Laing T., Sato M., Grubb M. and Comberti C., 2013. Assessing the effectiveness of the EU Emissions Trading System. Working Paper, Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment.
- Lambertini L. and Leitmann G., 2011. Market power, resource extraction and pollution : Some paradoxes and a unified view. Quaderni DSE Working Paper.
- LaPlace Conseil., 2013. The determinants of profitability of large steel companies.
- Lerner AP., 1934. The concept of monopoly and the measurement of monopoly power. *The Review of Economic Studies*, 1, 157-175.
- Lewis TR. and Schmalensee R., 1980. On oligopolistic markets for nonrenewable natural resources. *Quarterly Journal of Economics*, 95, 475-491.
- Libermann MB. and Johnson DR., 1999. Comparative productivity of US and Japanese producers 1958-1993. *Japan and the world economy*, 11, 1-27.

- Li J. and Sun L., 2010. Chinese steel enterprises strategies under the pricing model of iron ore in the world. *International Journal of Business and Management*, 5.
- Lin B. and Wang X., 2011. Exploring energy efficiency in China's iron and steel industry : A stochastic frontier approach. *Energy Policy*, 72, 87-96.
- Liu H., 2011. The study of iron ore pricing mechanism and China's countermeasure. *Contemporary Logistics*, 5.
- Lusky R., 1976. A model of recycling and pollution control. *Canadian Journal of Economics*, 9, 91-101.
- Ma J., Evans DG., Fuller RJ. and Stewart DF., 2002. Technical efficiency and productivity change of China's iron and steel industry. *International Journal of Production Economics*, 76, 292-312.
- Malthus T., 1798. *An Essay on the Principle of Population*. London, J.Johnson.
- Mansanet-Bataller M. and Sanin ME., 2014. Regulation as determinant of EU allowances prices. *Energy Studies Review*, 20, 66-89.
- Marshall A., 1890. *Principles of Economics*. MacMillian and Co.
- Marshall A., 1919. *Industry and trade : A study of industrial technique and business organization ; and of their influence on the condition of various classes and nations*, McMaster University.
- Martin R., Muuls M. and Wagner UJ., 2014. The impact of the EU-ETS on regulated firms : What is the evidence after nine years ?. Working Paper.
- Martin RE., 1982. Monopoly power and the recycling of raw materials. *The Journal of Industrial Economics*, 30, 405-419.
- McCarthy A. and Borkey P. , 2018. Mapping support for primary and secondary metal production. *OECD Environment Working Papers*, Paris.

- McKay H., Sheng Y. and Song L., 2010. China's metal intensity in a comparative perspective. Australian National University.
- McKinsey., 2013. Competitiveness and challenges in the steel industry.
- McKinsey., 2014. Learning of upstream integration of steelmakers.
- McKinsey and OECD Steel Committee, 2013. Overcapacities in the steel industry.
- Meadows DH., Meadows DL., Randers J. and Behrens WW., 1972. The limits to growth. the Club of Rome, Potomac Associates Books.
- Meunier G., Ponssard JP. and Quirion P., 2014. Carbon leakage and Capacity-Based allocations : Is the EU right ?. *Journal of Environmental Economics and Management*, 68, 262-279.
- Ministère de l'Economie, de l'Industrie et du Numérique, DG Trésor, 2014. Publication des services économiques - Bulletin économique Chine.
- Ministère de l'Economie, de l'Industrie et du Numérique, DG Trésor, 2016. Le secteur sidérurgiste chinois.
- Mioche P., 2004. Les cinquante années de l'Europe du charbon et de l'acier. Bruxelles, Commission Européenne.
- Monnet J., 1976. Mémoires. Paris, Fayard.
- Movshuk O., 2003. China's steel industry : Recent reform initiatives and their impact on enterprise performance. Working Paper, The international Centre for the study of the East Asian Development.
- Mueller H., 1984. Protection and competition in the US steel market : A study of managerial decision making in transition. Business and Economics Research Center, Middle Tennessee State University.
- Musacchio A., Khanna T. and Bernhardson J., 2010. In the spotlight : The market for iron ore. Harvard Business Review, Case study.

- Muuls M., Colmer J., Martin R. and Wagner U., 2016. Evaluating the EU-ETS : take it or leave it ? An assessment of the data after ten years. Working Paper, Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment.
- Neuhoff K., Acworth W., Ancygier A., Branger F., Christmas I., Haussner M., Ismer R., Van Rooij A., Sartor O., Sato M. and Schopp A., 2014. Carbon control and competitiveness post 2020 : The steel report. Climate Strategies.
- Norgate T. and Haque N., 2010. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production*, 18, 266-274.
- Ochieng G., Nkwonta O. and Seanego ES., 2010. Impacts of mining on water resources in South Africa : A review. *Scientific Research and Essays*, 5, 3351-3357.
- Ohashi N., 1992. Innovation and technical development in the Japanese steel industry. Center on Japanese Economy and Business, Columbia Graduate School of Business.
- OECD, 2001. Extended Producer Responsibility : A guidance manual for governments. OECD Library.
- OECD, 2001. Measuring capital : Measurement of capital stocks, consumption of fixed capital and capital services. OECD Library.
- OECD, 2007. Améliorer les marchés du recyclage. OECD Library.
- OECD, 2018. OECD Steel Market Developments series (based on information from Platt's).
- OECD, 2018. Global material resources outlook to 2060 : Economic drivers and environmental consequences. OECD Library.
- Okereke C. and McDaniels D., 2012. To what extent are EU steel companies susceptible to competitive loss due to climate policy ?. *Energy Policy*, 46, 203-215.

- Olsson A. and Warell L., 2009. Trends and development in the intensity of steel use : An econometric analysis. Conference Paper, Lulea University.
- Pakravan K., 1977. A model of oil production development and exploration. *Journal of Energy and Development*, 3, 143-153.
- Palmer K., Sigman H. and Walls M., 1997. The cost of reducing municipal solid waste. *Journal of Environmental Economics and Management*, 33, 128-150.
- Pardo N. and Moya JA., 2013. Prospective scenarios on energy efficiency and CO2 emissions in the European iron and steel industry. *Energy*, 54, 113-128.
- Pauliuk S., Wang T. and Müller D., 2013. Steel all over the world : Estimating in-use stocks of iron for 200 countries. *Resources, Conservation and Recycling*, 71, 22-30.
- Pearce DW. and Turner RK., 1991. Economics of natural resources and the environment. *American Journal of Agricultural Economics*, 73.
- Perroux F., 1964. *L'économie du 20ème siècle*. Presse Universitaire de Grenoble.
- Perry MK., 1989. Vertical integration : Determinants and effects. *Handbook of Industrial Organization*, 1.
- Petrack S. and Wagner UJ., 2015. The impact of carbon trading on industry : Evidence from German manufacturing firms. Working Paper, Kiel Institute for the World Economy.
- Pigou AC., 1932. *The economics of welfare*. London Macmillan, 4th Edition.
- Porter ME., 1982. *Choix stratégiques et concurrence*. Economica.
- Preston R., 1992. *American steel*. Avon Books.
- Quirion P., 2009. Historical *vs* Output-Based Allocation of GHG tradable allowances : a comparison. *Climate Policy*, 9, 575-592.

- Rebiasz B., 2006. Polish steel consumption 1974-2008. *Resources Policy*, 31, 37-49.
- Reinaud J., 2008. Issues behind competitiveness and carbon leakage : Focus on heavy industry. IEA Information Paper, International Energy Agency/OECD.
- Requate J., 2005. Environmental policy under imperfection : A survey. Working Paper, University of Kiel.
- Holloway J., Ivan R. and Rush A., 2008. China's steel industry. Reserve Bank of Australia.
- Ricardo D., 1817. *On the Principles of Political Economy and Taxation*. London, J. Johnson.
- Ridsdale M., 2011. Industry background and analysis. Resource Capital Research.
- Ritz R., 2016. Oligopolistic competition and welfare. Working Paper, University of Cambridge.
- Rogers CD., 1987. Long term contracts and market stability. *Resources Policy*, 13, 3-18.
- Rogers RP., 2009. *An economic history of the American steel industry*. Routledge.
- Salo S. and Tahvonen O., 2001. Oligopoly equilibria in non-renewable resource markets. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 25, 671-702.
- Sandbag, 2011. Carbon fat cats 2011 : The companies profiting from the EU ETS.
- Sartor O., Palliere C. and Lecourt S., 2014. Benchmark-based allocation in EU-ETS Phase 3 : An early assessment. *Climate Policy*, 14, 507-524.
- Say JB., 1803. *Traité d'économie politique*. Paris, Calmann-Lévy.
- Schaefer M., Scheelhaase J., Grimme W. and Maertens S., 2010. The economic impact of the upcoming EU-ETS on airlines and EU Member States : An empirical estimation. *European Transport Research Review*, 2, 189-200.

- Scheel H., 2001. Undesirable outputs in efficiency valuations. *European Journal of Operational Research*, 132, 400-410.
- Scheuplein C., 2010. Vertical integration and macroeconomic growth : The case of the steel industry. *Erdkunde*, 64, 327-341.
- Sigman H., 1995. A comparison of public policies for lead recycling. *The RAND Journal of Economics*, 26, 452-478.
- Siitonen S., Tuomaala M. and Ahtila P., 2010. Variables affecting energy efficiency and CO2 emissions in the steel industry. *Energy Policy*, 38, 2477-2485.
- Sijm J., Neuhoﬀ K. and Chen Y., 2006. CO2 cost pass-through and windfall profits in the power sector. *Climate Policy*, 6, 49-72.
- Silva MD., Costa-Muniz A., Hoffmann R. and Luz Lisboa A., 2018. Impacts of greenhouse gases on surface coal mining in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 193, 206-216.
- Simpson D., 1995. Optimal pollution taxation in a Cournot duopoly. *Environmental and Resource Economics*, 6, 359-369.
- Slade ME., 1980. An econometric model of the US secondary copper industry : recycling *vs* disposal. *Journal of Environmental Economics and Management*, 7, 123-141.
- Slade ME., 1989. The two pricing systems for non-ferrous metals. University of British Columbia.
- Slade ME., 1991. Market structure, marketing method and price instability. *The Quarterly Journal of Economics*, 106, 1309-1340.
- Slade ME. and Thille H. 2009. Whither Hotelling : tests of the theory of exhaustible resources. *Annual Review of Resource Economics*, 1, 239-259.
- Song L. and Liu H., 2012. The Chinese steel industry's transformation : Structural change, performance and demand on resources. *Edward Elgar*, 3-6.

- Sourisseau S., 2018. The global iron and steel industry : From a bilateral oligopoly to a thwarted monopsony. *The Australian Economic Review*, 51, 232-243.
- Sourisseau S., De Beir J. and Ha Huy T., 2018. The effect of recycling over a mining oligopoly. Working Paper, EPEE, University of Evry-Paris Saclay.
- Stackelberg (Von) H., 1934. *Market structure and equilibrium*. Springer, Berlin.
- Sterner T. and Muller A., 2008. Output and abatement effects of allocation readjustment in permit trade. *Climate Policy*, 86, 33-49.
- Stiglitz J., 1976. Monopoly and the rate of extraction of exhaustible resource. *American Economic Review*, 66, 655-661.
- Stiglitz J. and Dasgupta P., 1982. Market structure and resource depletion : A contribution to the theory of intertemporal monopolistic competition. *Journal of Economic Theory*, 28, 128-164.
- Sugimoto T., 1993. *The Chinese steel industry*. Institute of developping economies.
- Sukagawa P., 2010. Is iron ore priced as a commodity ? Past and current practices. *Resources Policy*, 35, 54-63.
- Suslow VY., 1986. Estimating monopoly behavior with competitive recycling : An application to Alcoa. *The RAND Journal of Economics*, 17, 389-403.
- Swan PL., 1980. The influence of recycling on monopoly power. *Journal of Political Economy*, 88, 76-99.
- Tarr DG., 1988. The steel crisis in the United States and the European Community : Causes and adjustments. *National Bureau of Economic Research*, 173-200.
- Tian Y., Zhu Q. and Geng Y., 2013. An analysis of energy-related greenhouse gas emissions in the Chinese iron and steel industry. *Resources Policy*, 56, 352-361.
- Tirole J., 1988. *The theory of Industrial Organization*. MIT Press.

- Tornell A., 1997. Rational atrophy : The US steel industry. National Bureau of Economic Research, Harvard University.
- UNCTAD, 2011. Etude sur les transports maritimes.
- UNCTAD, 2014. The iron ore market 2012-2014, Stockholm, Raw Materials Data Iron ore.
- US EPA, 1994. Technical Document - Acid Mine Drainage prediction . US Environmental Protection Agency.
- USGS, 2014. Estimated use of water in the United-States in 2010. US Geological Survey
- US Department of Justice - Federal Trade Commission, 2010. Horizontal mergers guidelines. US Department of Justice.
- Wagner UJ., Muuls M., Martin R. and Colmer J., 2014. The causal effects of the EU-ETS : Evidence from the French manufacturing plants. Fifth World Congress of Environmental and Resource Economists.
- Walls M. and Palmer K., 1997. Optimal policies for solid waste disposal : Taxes, subsidies and standards. *Journal of Public Economics*, 65, 193-205.
- Walls M., 2011. Deposit-Refund systems in practice and theory. Discussion Paper, Resources for the Future.
- Walter A. and Mueller H., 1986. The steel industry : In structure of American industry. Ed. Walter Adams, New-York.
- Wan R. and Boyce JR., 2014. Non-renewable resource Stackelberg games. *Resource and Energy Economics*, 37, 102-121.
- Warell L., 2007. A horizontal merger in the iron and steel industry : An event study approach. *Resources Policy*, 32, 191-204.

- Warell L. and Lundmark R., 2008. Price effects of mergers in natural resources industries. *Resources, Conservation and Recycling*, 53, 57-69.
- Warell L., 2014. The effect of a change in pricing regime on iron ore prices. *Resources Policy*, 41, 16-22.
- Weinstein MC. and Zeckhauser R.J., 2018. Use patterns for depletable and recyclable resources : symposium on the economics of exhaustible resources. *Review of Economic Studies*, 41.
- Worell E., Martin N. and Price L., 2001. Energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the US iron and steel industry. *Energy*, 26, 513-536.
- Wu Y., 1995. The productive efficiency of Chinese iron and steel firms, Working Paper, University of Western Australia.
- Xu B. and Lin B., 2016. Assessing CO2 emissions in China's iron and steel industry : A dynamic vector autoregression model. *Applied Energy*, 161, 375-386.
- Ye L., Yan-Zhang W. and Qiang C., 2016. Has airline efficiency affected by the inclusion of aviation into the EU-ETS ? Evidences from 22 airlines during 2008-2012. *Energy*, 96, 8-22.
- Yi-Ming W., Hua L. and Ying F., 2007. An empirical analysis of energy efficiency in China's iron and steel sector. *Energy*, 32, 2262-2270.
- Yin X. and Chen W., 2013. Trends and development of steel demand in China : A bottom-up analysis. *Resources Policy*, 38, 407-415.
- Ying F., Jun-Jun J., Xin W. and Jin-Hua X., 2017. What policy adjustments in the EU-ETS truly affected the carbon prices ?. *Energy Policy*, 103, 145-164.
- Zhang Q. and Lan L., 2010. Commerce ministry studies foreign anti-monopoly probes. *China Daily*.

Zhou P., Ang BW. and Poh KL., 2008. A survey of Data Envelopment Analysis in energy and environmental studies. *European Journal of Operational Research*, 189, 1-18.

Liste des figures

1	L'économie circulaire (source : Ademe)	2
2	Schéma simplifié de la chaîne de valeur de la matière et cadre de travail de la thèse	4
3	Parts de marché de l'Australie et du Brésil dans l'offre de minerai de fer	6
4	Déroulement d'une opération minière (source : BRGM)	17
5	Effet du DMA sur la ressource en eau (source : Nasa)	19
I.1	Evolution des parts de marché des entreprises sidérurgiques européennes entre 1965 et 2002 (source : Mioche (2004))	35
I.2	Production sidérurgique de l'UE(27), des Etats-Unis et du Japon entre 1980 et 2000	42
I.3	Part de marché des entreprises minières, en % de la production mondiale	47
I.4	Production sidérurgique de la Chine entre 1980 et 2012	49
I.5	Production sidérurgique de l'UE(27), de l'Amérique du Nord et de la Chine entre 2000 et 2013	51
I.6	Production d'acier des 10 premiers sidérurgistes mondiaux	53
I.7	Capacités de production et consommation apparente d'acier mondiale, en Mt (source : Faure (2012))	59
I.8	Exportations de minerais de fer par firme, en Mt	65
I.9	Evolution du prix du minerai de fer en US\$/t (62% Fe, Port de Tianjin)	73

I.10	Equilibre et pertes sèches de l'oligopole (gauche) <i>vs</i> Equilibre et pertes sèches du monopsonne (droite)	80
II.1	Open-pit <i>vs</i> underground mining	103
II.2	Mining output (left) and market share (right) of the oligopoly with respect to n	122
II.3	Evolution of the recycling rate (left) and the secondary supply (right) with respect to n	123
II.4	Recycling rate (left) and outputs with respect to the level of technology	124
II.5	Recycling rate (left) and outputs with respect to the availability of scrap	126
II.6	Evolution of the price with respect to the availability of scrap (left) and the technology of recycling (right)	128
II.7	Evolution of the markup with respect to the availability of scrap (left) and the technology of recycling (right)	129
II.8	Evolution of the mark-up with respect to the recycling technology and according to various values of the demand scale : $A=0.8$ on top-left ; $A=1$ on top-right ; $A=5$ on bottom-left ; $A=10$ on bottom-right)	142
III.1	Social Welfare with the existence of recycling and a mining oligopoly	159
III.2	Variation of the social welfare with recycling and environmental externalities	161
III.3	Effect of a pollution-based tax on welfare	168
III.4	Effect of a recycling-related subsidy on welfare	170
III.5	Market share of recyclers in the supply of input to steelmakers . . .	173
III.6	Variation of welfare and external effect with respect to n , A and c .	184
III.7	Share of old scrap consumed by steelmakers	186
III.8	CO ₂ emissions avoided thanks to recycling	187
III.9	CO ₂ intensity of steel	187
IV.1	Average allocation for all installations	206

IV.2 Average allocation for the most CO ₂ efficient installations	207
IV.3 Average allocation for the less CO ₂ efficient installations	207
IV.4 Cumulated overallocation profit from 2007 to 2016, in absolute terms (top) and per ton produced (bottom)	210
IV.5 Overallocation profits of 2013-2016 with the current BM compared to our estimated BM	212
IV.6 Input intensities and efficient frontiers for the periods 2007-2012 and 2013-2016	214

Liste des tableaux

I.1	Comparaison internationale des coûts des principaux inputs en 1984	40
I.2	Classification des structures de marché	78
I.3	Production d'acier et statut des sidérurgistes chinois en 2014	93
III.1	The effect of recycling on welfare with/without environmental ex- ternalities	164
III.2	Comparative analysis	172
III.3	Values of parameters	178
III.4	Effects of a tax to mining and a subsidy to recycling on the supply of materials	179
III.5	Average secondary supply (in Mt) and market share (in %) over the period 1986-2016	185
III.6	Overview of the share of the steel consumption sectors (in %) . . .	188
III.7	Recycling rates of steel based on short lifespan products over 2006- 2016	189
IV.1	Market shares (2007-2016)	196
IV.2	CO ₂ Emission Intensities of the EU steelmaking installations (2007- 2016)	203
IV.3	Summary statistics	209
IV.4	Share of the firm's overallocation profit with respect to the overall granted to the sector	211

IV.5 Rankings from the CO ₂ emission performance scores of the steel-	
making firms (2007-2015)	215
IV.6 Comparison of efficiency with respect to the EU ETS Phases	217
IV.7 Comparison of efficiency with free EUAs as input	217
IV.8 The static CO ₂ emission performance scores of the steelmaking	
firms (2007-2015)	225

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	v
Abstract	ix
Sommaire	xii
Introduction	1
1 Economie linéaire et économie circulaire	1
2 Les marchés du minerai de fer et de l'acier	5
3 Le recyclage en tant qu'objet de la science économique : une nouvelle approche de la ressource	7
3.1 La prise en compte du recyclage dans la disponibilité d'une ressource dans le temps	7
3.2 La remise en cause du gisement traditionnel de matières premières avec l'existence du recyclage : la notion de « mines urbaines »	12
3.3 La concurrence en amont entre entreprises minières et recycleurs	15
4 La soutenabilité de l'offre de matières premières : autre enjeu de développement du recyclage	15
4.1 Identification des externalités	16

4.2	L'introduction des externalités environnementales et des politiques publiques dans l'analyse	20
5	La structure de la thèse	21
I	Les marchés mondial du fer et de l'acier : du choc de demande des années 2000 à l'émergence d'un monopsonne contrarié	25
1	Introduction	29
2	La filière sidérurgique : de la régionalisation à la mondialisation des rapports économiques pendant la seconde moitié du 20 ^{ème} siècle . . .	31
2.1	Du développement d'une sidérurgie régionale à l'émergence d'une concurrence internationale	32
2.2	La stabilité des rapports entre entreprises minières et sidérurgistes et le rôle du transport maritime dans la mondialisation du marché	45
3	Le bouleversement de la filière sidérurgique au début de années 2000	48
3.1	Le choc de demande	48
3.2	L'accélération de l'internationalisation des sidérurgistes comme réponse à la nouvelle concurrence ?	51
3.3	Les enjeux stratégiques de la filière	54
4	Le rôle des entreprises minières dans une structure de marché en mutation : d'un oligopole à un potentiel monopsonne contrarié	61
4.1	L'effet des fusions et acquisitions sur la concentration de la production	62
4.2	L'oligopole théorique à l'épreuve des faits	64
4.3	La remise en cause de l'oligopole depuis 2014 ?	74
4.4	Le monopsonne contrarié : une structure de marché entre l'oligopole et le monopsonne	78
5	Conclusion	81
	Annexes I	84
I.A	Fabrication de l'acier et typologie des principaux produits	84

I.A.1	Les procédés de production	84
I.A.2	Typologie de produits sidérurgiques	87
I.B	L'offre sidérurgique aujourd'hui	90
I.B.1	Les acteurs globalisés	90
I.B.2	Les spécialistes régionaux : des acteurs historiques et la montée en puissance des sidérurgistes chinois	91
I.B.3	Les spécialistes de niche	93
II	The effect of recycling on a mining oligopoly : competition for market shares and collusion for market power	95
1	Introduction	99
2	A non-competitive market structure of mining : overview of the costs and market-power	102
2.1	A high fixed cost, a low variable cost	102
2.2	Market power for non-competitive mining firms	104
3	The effect of a secondary substitute on the market power : the Alcoa case	106
4	The Cournot-Stackelberg model for a recycling-mining competition	111
4.1	A basic two-period approach	111
4.2	The steady state model	117
5	Numerical applications	121
5.1	A more competitive mining sector	121
5.2	Recycling technology, availability of scrap and the effect on competition	123
5.3	Recycling technology, availability of scrap and the mining market power	127
6	Discussion about mining strategies	130
7	Conclusion	132
	Annexes II	134

II.A The mining output with the presence of recycling and proof of Proposition 1	134
II.B Proof of Proposition 2	136
II.C The steady state equilibrium	138
II.C.1 Equation (II.16)	138
II.C.2 Equation (II.17)	139
II.C.3 Equation (II.18)	139
II.D Scale of demand and mining market power	142
III Welfare and public policies within a recycling-mining competition framework	143
1 Introduction	147
2 Recycling within the economic literature	150
2.1 Recycling as a substitute for disposal	150
2.2 Recycling as a substitute for mining	153
3 The Model	155
3.1 The secondary sector	156
3.2 Mining output and equilibrium	157
3.3 Social welfare	158
4 Public policies	165
4.1 A pollution-based tax	165
4.2 A recycling subsidy	168
4.3 Tax on mining pollution or subsidy on waste recycling?	171
5 Application	173
5.1 The iron and steel industry	173
5.2 Data	175
5.3 Results	178
6 Conclusion	180
Annexes III	182
III.A Optimal mining output	182

III.B Tests of sensitivity	183
III.C Market share of recyclers	184
III.D Environmental gains thanks to recycling and CO ₂ intensity	186
III.E The share of short lifespan steel products	188
III.F Recycling rates	188
IV The EU Emissions Trading System and the steelmaking industry : Climate policy <i>vs</i> Competition policy	190
1 Introduction	194
2 The EU ETS as the cornerstone of the European climate policy . .	197
2.1 Insight of the literature review	197
2.2 EUAs allocation rules	199
3 Heterogeneity in CO ₂ and allowances among the steelmaking installations	201
3.1 Data	202
3.2 Distribution of allowances : BM value and Output-Based Allocation	204
4 EU ETS and competition	208
4.1 Market shares and overallocation profits	208
4.2 Measuring efficiency with a DEA-based environmental performance evaluation	212
5 Conclusion	218
Annexes IV	220
IV.A Methodology of DEA : static and dynamic approaches	220
IV.A.1 DEA with undesirable outputs	220
IV.A.2 The Malmquist-Luenberger Productivity Index	223
IV.B DEA results	225
Conclusion générale	227
1 Contributions de la thèse	227
2 Perspectives de recherche	234

TABLE DES MATIÈRES	269
Bibliographie	237
Liste des figures	259
Liste des tableaux	262
Table des matières	264

Titre : Recyclage vs extraction minière: concurrence, externalités environnementales et politiques publiques sur les marchés du fer et de l'acier

Mots clés : recyclage des métaux, oligopole minier, pouvoir de marché, matières premières, sidérurgie, marché du carbone européen

Résumé : Tout en étant une solution de gestion des produits en fin de vie, le recyclage s'avère être une alternative à la production de matières premières vierges. Dans le cadre de cette thèse, nous nous interrogeons donc sur cette nouvelle forme de concurrence que peut potentiellement apporter les recycleurs, sur un marché des matières premières traditionnellement dominé par un oligopole minier. Dans quelle mesure les recycleurs peuvent-ils concurrencer les firmes minières et quels sont les effets sur l'oligopole? Comme deuxième axe de recherche, nous tenons compte du différentiel d'externalités environnementales qui existe entre les deux types d'offre. Nous intégrons donc dans notre modèle une subvention au recyclage ainsi qu'une taxe sur la pollution minière, ceci, en réponse aux deux distorsions de marché que sont la structure non concurrentielle de l'extraction minière et les externalités qui sont associées à cette activité. Pour donner une dimension empirique à cette thèse, nous utilisons les marchés du minerai de fer et de l'acier. Dans le cadre de cette thèse, nous nous interrogeons sur la concurrence entre les recycleurs et un oligopole minier, tout en tenons compte du différentiel d'externalités environnementales qui existe entre les deux types d'offre, et donc de politiques publiques. Pour donner une dimension empirique à cette thèse, nous utilisons les marchés du minerai de fer et de l'acier. Préalablement à l'analyse de la concurrence avec les recycleurs, nous effectuons dans le cadre du **Chapitre 1**, une analyse de l'évolution des marchés du fer et de l'acier suite au choc de demande des années 2000. La concentration de la demande autour des sidérurgistes chinois ainsi que la stratégie mise en place par les autorités à partir de 2010, aboutissent à l'existence d'un monopsonne contrarié sur le marché mondial du minerai de fer. En se recentrant sur l'amont de la chaîne de valeur, notre **Chapitre 2** pose le cadre théorique de la concurrence entre les entreprises minières et les recycleurs. A travers un modèle Cournot-Stackelberg, nous montrons que la part de marché du secteur minier augmente avec le degré de concurrence de ce secteur. Les recycleurs ne peuvent en effet pas augmenter de manière significative leur part de marché si une technologie

de recyclage efficace n'est pas, dans le même temps, associée à une importante disponibilité de déchets. Cette double condition est également nécessaire pour garantir la diminution de la rente minière. Par ailleurs, nous mettons en avant l'existence d'un niveau de technologie de recyclage minimum pour que les recycleurs puissent entrer sur le marché. La prise en compte du différentiel d'externalités environnementales dans le **Chapitre 3** renforce la nécessité d'une augmentation de l'offre de matières secondaires, au regard de son effet bénéfique sur le bien-être. L'instauration d'une taxe environnementale sur la production minière s'avère, à cet effet, moins pertinente qu'une subvention au recyclage. La taxe renforce la contrainte de capacités pour les recycleurs, repose sur une nécessaire évaluation de la pollution minière difficile à réaliser pour certaines matières premières, et des limites quant à sa mise en œuvre semblent également se poser. A l'inverse, sur le marché du minerai de fer, l'instauration d'une subvention au recyclage aurait des effets significatifs sur les parts de marché des recycleurs et sur la nécessaire baisse des dommages liés à l'extraction. Comme nous le montrons, la différence d'effets entre les deux politiques est d'autant plus forte lorsque le niveau de recyclage initial est faible. Enfin, en s'intéressant à une politique publique axée sur la demande de matières plutôt que sur l'offre, le **Chapitre 4** met en exergue la faible incitation du marché européen du carbone sur la baisse des émissions de CO₂ des sidérurgistes, et donc sur un potentiel recours accru à la matière secondaire. Nous montrons également comment cette politique climatique interfère avec la politique de concurrence car elle bénéficie essentiellement aux leaders du marché, au détriment du principe de concurrence libre et non faussée qui prévaut au sein du marché commun. Plus surprenant, nos résultats indiquent que le leader du marché est la firme la moins efficace dans la consommation de matières premières, par rapport à la quantité d'acier produite et aux émissions de CO₂ générées. A l'inverse, la firme qui semble être la plus efficace est, dans le même temps, celle qui aurait été la moins avantagée dans l'attribution des quotas gratuits depuis 2007.

Title : Recycling vs Mining: competition, environmental externalities and public policies in the iron and steel industry

Keywords : metal recycling, mining oligopoly, market power, raw materials, steelmaking, EU-ETS

Abstract : In addition to a solution for managing end-of-life products, recycling is also an alternative to the production of virgin raw materials. In this thesis, we are therefore wondering about this new form of competition that could potentially include recyclers, on a commodity market traditionally dominated by a mining oligopoly. To what extent can recyclers compete with mining firms and what are the effects on oligopoly? As a second line of research, we consider the differential of environmental externalities that exists between the two types of supply. We therefore include in our model a recycling subsidy and a tax on mining pollution, in response to the two market distortions: the non-competitive structure of mining extraction and the externalities that are associated with this activity. To give an empirical dimension to this thesis, we use the iron and steel industry. Prior to the analysis of the competition with recyclers, we carry out in **Chapter 1**, an analysis of the evolution of the markets of iron and steel following the demand shock since the year 2000. The concentration of the demand from Chinese steelmakers as well as the strategy put in place by the authorities from 2010, led to a new market structure of the world iron ore market: a thwarted monopsony. By focusing on the upstream value chain, **Chapter 2** sets the theoretical framework for competition between mining firms and recyclers. Through a Cournot-Stackelberg model, we show that the market share of the mining sector increases with the degree of competition in this sector. Recyclers cannot significantly increase their market share if an efficient recycling technology is not associated with a high availability of waste. This dual condition is also necessary to ensure the reduction of the mining rent. In addition, we high-

light the requirement of a minimum level of recycling technology for recyclers to enter the market. Taking into account the differential of environmental externalities in **Chapter 3** strengthens the need for increasing the supply of secondary materials, with regard to its positive effect on social welfare. For this purpose, the introduction of an environmental tax on mining extraction is less relevant than a subsidy for recycling. The tax reinforces the capacity constraint for recyclers, relies on a necessary assessment of mining pollution that is difficult to achieve for certain raw materials, and there are limits on its implementation which also seem to arise. On the other hand, the introduction of a recycling subsidy would have a significant impact on recyclers' market share and the necessary reduction of extraction-related damages. As we show, the difference in effects between the two policies is even stronger when the initial level of recycling is low. Finally, by focusing on a public policy based on the demand for materials rather than on supply, **Chapter 4** highlights the weak incentive of the EU-ETS to reduce CO₂ emissions from steelmakers, and therefore a potential increase of the secondary input instead of the virgin one. We also show how this climate policy interferes with the EU competition policy because it mainly benefits market leaders, to the detriment of the principle of free and undistorted competition prevailing in the EU market. More surprisingly, our results indicate that the market leader is the least efficient firm in the consumption of raw materials, considering the quantity of steel produced and the CO₂ emissions generated. Conversely, the firm that seems to be the most efficient would also have been least favoured when free allowances were allocated from 2007 onwards.

