

DÉPARTEMENT D'ÉCONOMIQUE

Faculté d'Administration (Université de Sherbrooke)

**BILAN DES FUTES D'ÉMISSIONS DE DIOXYDE DE
CARBONE INCORPORÉES AU COMMERCE BILATÉRAL
ENTRE LA FRANCE ET LA CHINE, 1996 À 2003.**

Par

JOHAN JACQUEMIN

Mémoire présenté à :

JIE HE

NICOLAS-GUILLAUME MARTINEAU

VALÉRIE VIERSTRAETE

Activité ECN 866

Sherbrooke Avril 2013

Avant-propos

Ce mémoire a été réalisé par Johan Jacquemin, dans le but obtenir le diplôme de Maitrise en Analyse Économique de l'Université de Sherbrooke.

Le travail a été effectué sous la supervision du docteur Jie He, de l'Université de Sherbrooke. C'est à ce titre, que je tiens à remercier de tout cœur le docteur Jie He pour ses conseils avisés, pour sa patience, et pour son dévouement sans failles dans le suivi de ce mémoire.

J'adresse par la même occasion mes plus sincères remerciements à mes deux lecteurs, Valérie Vierstraete et Nicolas-Guillaume Martineau, pour la patience dont ils ont fait preuve pour la correction de ce mémoire de Maitrise.

Je tiens aussi à remercier l'ensemble de mes proches qui ont de près ou de loin suivi l'avancement de ce long mémoire de Maitrise.

Liste des abréviations & des unités

ALENA : Accord de libre-échange nord-américain

AMDI : Méthode arithmétique de Divisia (Arithmetic mean Divisia index)

AIE : Agence internationale de l'énergie

BEET : Balance des émissions incorporées au commerce (Balance of emissions embodied in trade)

CI : Consommation intermédiaire

CCNUCC : Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques

CITI : Classification internationale type par industrie (ou International Standard Industrial Classification of All Economic Activities, ISIC en anglais.).

CO₂ : Dioxyde de carbone

DGCIS : Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services.

EDR: eMergy/dollars

EEBT Embodied emission in bilateral trade

END-USE : utilisation énergétique finale

GES : Gaz à effet de serre

GIEC : Groupe d'experts international sur l'évolution du climat

INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques

LMDI: Logarithme mean Divisia index

MRIO: Multirégional input output model

NACE : Nomenclature générale des Activités économiques dans les Communautés Européennes

NAF : Nomenclature des Activités Françaises

NCA : Non classé ailleurs

NCE : Nomenclature d'activités économiques pour l'étude des livraisons et Consommation d'Énergie.

NES114 : Nomenclature Économique de Synthèse en 114 postes

OCDE : Organisation pour le commerce et le développement économique

PED : Pays en voie de développement

PPP : Parité du pouvoir d'achat

SESSI : Service des études statistiques industrielles

SDA: Analyse de décomposition structurelle (Structural decomposition analysis)

SDGC : Section, division, groupe, ou classe.

SO₂ : Dioxyde de soufre

SRIO: single region input output

STAN : Structural analysis

TWH : Téra watt heure

TES : Tableau Entrées-Sorties

UE : Union européenne

tCO₂ : Tonne de CO₂, 10⁶ grammes de CO₂

KtCO₂ : Kilotonne de CO₂, 10⁹ grammes de CO₂

MtCO₂ : Mégatonne de CO₂, 10¹² grammes de CO₂

GtCO₂ : Gigatonne de CO₂, 10¹⁵ grammes de CO₂

K\$: Millier de dollars US

M\$: Million de dollars US

G\$: Milliard de dollars US

Liste des illustrations

<i>Figure 1.1 Émissions de CO2 France - Chine (données en annexe 1.2)</i>	15
<i>Figure 1.2 Commerce bilatéral France - Chine (France en bleu, Chine en rouge)</i>	16
<i>Figure 3.1 Intensité totale des secteurs chinois</i>	46
<i>Figure 3.2 Intensité totale des secteurs français en 2003</i>	47
<i>Figure 3.3 Commerce bilatéral France Chine</i>	48
<i>Figure 3.4 Balance des émissions incorporées au commerce (BEET)</i>	50
<i>Figure 3.5 Relations commerce et environnement 2001</i>	52
<i>Figure 4.1 Décomposition</i>	63
<i>Figure 4.2 Les trois effets sur les émissions incorporées aux exportations chinoises</i>	64
<i>Figure 4.3 Les trois effets sur les émissions incorporées aux exportations françaises</i>	65
<i>Figure 4.4 Volume de l'effet de composition</i>	67
<i>Figure 4.5 Variations de l'intensité totale chinoise, de 1996 à 2003 (Valeurs en annexe 4.5)</i>	74
<i>Figure 4.6 Les changements technologiques du secteur chimique et sidérurgique sur les externalités des autres secteurs, 1996 - 2003</i>	75
<i>Figure 4.7 Pression du secteur Sidérurgie et secteur des services sur l'effet technique français 1996 - 2003</i>	80
<i>Figure 4.8 La variation de l'efficacité énergétique interne du secteur de la sidérurgie</i>	81
<i>Figure 4.9 La variation de l'efficacité énergétique interne du secteur des services</i>	82
<i>Figure 5.1 Les émissions avec commerce (réelles), et émissions sans commerce (fictives)</i>	87
<i>Figure 5.2 Émissions chinoises incorporées aux exportations en France en 2003</i>	89
<i>Figure 5.3 Émissions françaises incorporées aux exportations en Chine en 2003</i>	90
<i>Figure 5.4 Les effets du commerce international en 2003</i>	92
<i>Figure 5.5 Les effets du commerce international en 1997</i>	93
<i>Figure 5.6 Décomposition des responsabilités par Lenzen et al (2007)</i>	101
<i>Figure 5.7 Comparatifs de la méthode de Lenzen et al (2007) et de la méthode classique sur le calcul de l'intensité chinoise en 2003</i>	103
<i>Figure 5.8 Comparatifs de la méthode de Lenzen et al (2007) et de la méthode classique sur le calcul de l'intensité française en 2003</i>	104

<i>Table 3.1 Évolution temporelle de l'intensité nationale</i>	45
<i>Table 3.2 régressions annuelles de la relation entre commerce et environnement.</i>	53
<i>Table 4.1 Effet de composition sectoriel chinois</i>	70
<i>Table 4.2 Différences entre η_i et η_{inet} pour la Chine</i>	71
<i>Table 4.3 Effet de composition sectoriel français</i>	72
<i>Table 4.4 Variation de la CI du secteur informatique et textile, Chine 1996-2003</i>	76
<i>Table 4.5 Résumé des principales mesures du chapitre 4.</i>	83
<i>Table 5.1 décomposition des variations dans la création d'émission sur les années 1997-2003</i> ..	96
<i>Table 5.2 Responsabilité producteur versus consommateur.</i>	99
<i>Table 5.3 Responsabilité producteur versus consommateur</i>	105
<i>Table 5.4 Scénario de taxe à 20\$ sur les émissions directes/totales incorporées aux exportations</i>	109
<i>Table 5.5 Objectifs d'une taxe carbone</i>	110
<i>Table 5.6 Comparatif sectoriel Chine, des scénarios de taxe directe ou de taxe totale, année</i> <i>2003.</i>	111
<i>Table 5.7 Comparatif sectoriel France, des scénarios de taxe directe ou de taxe totale, année</i> <i>2003.</i>	112
<i>Table 5.8 Scénario de taxe 2, émissions créées</i>	113
<i>Table 5.9 Taxation des fuites de CO₂</i>	114
<i>Table 5.10 Crédits carbone français.</i>	115

Table des matières

Avant-propos	2
Liste des abréviations & des unités.....	3
Liste des illustrations.....	5
Table des matières	7
1 Introduction.....	9
1.1 Mise en contexte	10
1.2 Problématique	12
1.3 Cadre d'étude	14
1.4 Plan de l'étude.....	18
2 Revue de littérature	19
2.1 Le commerce et la pollution.....	20
2.2 Les émissions de CO ₂ incorporées au commerce.	23
2.2.1 Aperçu global des émissions incorporées au commerce.....	23
2.2.2 Focus sur la Chine	25
2.2.3 Le cas de la France	27
2.3 Méthodologies utilisées dans l'étude	28
2.3.1 Méthodologie de la BEET	28
2.3.2 Analyse de décomposition structurelle (SDA)	33
2.3.3 Responsabilités	37
3 Balance des émissions incorporées au commerce France-Chine	40
3.1 Récupération des données.....	41
3.2 Méthodologie	42
3.2.1 Intensité directe d'émission de CO ₂	42
3.2.2 Intensité totale d'émission de CO ₂	43
3.3 Résultats des calculs	44
3.3.1 L'intensité d'émission totale de CO ₂	45
3.3.2 La balance des émissions de CO ₂	48
3.3.3 Le commerce international et les émissions de CO ₂	51
3.4 Conclusion	55

4	Analyse de décomposition structurelle (SDA)	57
4.1	L'approche méthodologique	58
4.1.1	Le modèle LMDI	58
4.1.2	Représentation graphique	63
4.2	Les trois effets sur le commerce	64
4.2.1	Domination de l'effet d'échelle	64
4.2.2	L'analyse de l'effet de composition	66
4.2.3	L'effet technique chinois	73
4.2.4	Effet technique français	78
4.3	Conclusion	83
5	Les conséquences du commerce France-Chine	85
5.1	Les conséquences du commerce France-Chine	86
5.1.1	Balance des émissions créées/réduites	86
5.1.2	Création contre réduction des émissions sectorielles	88
5.1.3	La situation sectorielle globale	91
5.1.4	Décomposition des émissions créées/réduites	94
5.2	Solutions politiques	98
5.2.1	Basculement de la responsabilité producteur au consommateur	98
5.2.2	La distribution de Lenzen <i>et al</i> (2007)	100
5.2.3	La taxation du CO ₂ incorporé au commerce	106
6	Conclusion	117
7	Bibliographie	122
	Annexes	129

1 Introduction

Si la quantité de [gaz] carbonique dans l'air chute de moitié par rapport à son niveau actuel, la température chutera d'environ 4 degrés; une diminution à 25% du niveau réduira la température de 8 degrés. D'un autre côté, doubler le pourcentage de dioxyde de carbone dans l'air augmentera la température de la surface de la Terre de 4 degrés, et si le dioxyde de carbone est quadruplé, la température pourrait augmenter de 8 degrés.

Arrhenius (1896)

1.1 Mise en contexte

La prise de conscience des incidences de l'action humaine sur le climat date du siècle dernier. Dès 1900, plusieurs chercheurs (Arrhenius, Angström) travaillent sur la capacité d'absorption de la chaleur par le CO₂. Aux États-Unis, les premiers relevés de CO₂ remontent aux années 1950. Et aujourd'hui, la lutte contre le réchauffement climatique est un sujet d'actualité encore très jeune. Le premier sommet de la terre qui s'est tenu à Stockholm (Suède) en 1972 donne naissance au programme des Nations Unies pour l'environnement. La conférence internationale de Genève en 1979 reconnaît pour la première fois la gravité de l'impact humain sur le climat. Le sommet de la terre de 1992 à Rio (Brésil) laisse derrière lui la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Ces avancées politiques produiront en 1997 le protocole de Kyoto, signé durant la troisième conférence des parties à la CCNUCC, ratifié le 16 février 2005, et aujourd'hui seul protocole contraignant sur les gaz à effet de serre (GES).

Le protocole de Kyoto est un accord international de lutte contre les changements climatiques provoqués par 8 GES, dont le CO₂ est le plus important. Le protocole de Kyoto exige de la part des pays signataires listés dans l'annexe B, la réduction moyenne de leurs émissions de GES de 5,2%, sur la période 2008-2012, par rapport aux niveaux d'émission constatés en 1990. Les pays annexe B sont des pays industrialisés comme les pays de l'Union européenne (UE), l'Australie, la Russie ou bien le Canada (retiré du protocole en 2011).

L'avancée politique exceptionnelle que représente le protocole de Kyoto est toutefois teintée d'un problème particulier. Lors de la rédaction du protocole de Kyoto, les états se sont mis d'accord pour que le principe responsabilité commune mais différenciée de la CCNUCC permette aux pays en voie de développement (PED) de se développer en dehors de toute contrainte de limitation des GES. Apparaît alors les pays non-annexe B qui n'ont aucun objectif de réduction de leurs GES (ils doivent seulement comptabiliser leurs émissions chaque année). En effet, par souci et justice internationale les pays développés, premiers pollueurs, doivent être les premiers à lutter contre le réchauffement qu'ils ont créé. Cependant, cette situation mêlée à la mondialisation va créer un grave problème d'efficacité pour le seul protocole contraignant sur les GES. Ce problème est notre sujet d'analyse : *les fuites d'émissions de CO₂ incorporées au commerce international*.

Le commerce international est l'échange entre nations de toutes sortes de biens finis, de biens intermédiaires, de biens industriels, de biens agricoles, de ressources énergétiques, de flux financiers, de technologies, ou de services. Mais, pour concevoir cette richesse qui sera échangée entre les nations, régions, villes, à petite ou à grande échelle il est inévitable d'émettre du CO₂ ou d'autres GES.

L'échange lie entre elles toutes les nations du monde civilisé par les noeufs communs de l'intérêt, par des relations amicales, et en fait une seule et grande société.

Ricardo

Comment considère-t-on alors le cas du CO₂ émis pour la conception d'un bien qui sera ensuite échangé et consommé à l'étranger ? La littérature utilise des modélisations pour intégrer virtuellement ces émissions de CO₂ dans les biens échangés. C'est ce que l'on appelle *les émissions incorporées au commerce*. Mais en réalité, ces émissions de CO₂ ne sont pas captées, intégrées aux biens, puis échangées elles aussi. Elles restent sur place, puis peu à peu, se dispersent dans l'atmosphère, créant une externalité globale. Une autre question serait alors de savoir qui, de l'exportateur ou de l'importateur, est responsable de cette externalité ?

À cette question, le protocole de Kyoto répond que les nations doivent comptabiliser des émissions de CO₂ produites, qui proviennent des biens et services produits sur le territoire. Nous devons alors faire la distinction avec les émissions consommées, qui proviennent des biens et services consommés (comprenant les biens et services produits et consommés sur le territoire, mais aussi les biens et services importés pour être consommés). En effet, nous comprenons qu'il existe une différence entre la quantité de CO₂ produite par un pays, et la quantité de CO₂ consommée par ce même pays, aussi selon Kyoto un pays ne serait responsable que de sa production ? Nous pouvons alors imaginer que, si le protocole de Kyoto ne contraint qu'une catégorie de pays à limiter leur production de CO₂, ces pays pourront s'approvisionner en CO₂ virtuel à l'étranger, c'est-à-dire acheter des biens produits à l'étranger qui auront nécessité de l'émission de CO₂. Ce phénomène de passager clandestin entraîne alors ce que la littérature existante appelle *les fuites de CO₂*.

1.2 Problématique

Si l'on en croit la littérature existante sur le sujet, les émissions incorporées au commerce sont loin d'être marginales dans le total mondial. En 1990 elles représenteraient plus de 4 milliards de tonnes sur un total d'émission mondiale de 20 milliards de tonnes de CO₂ (Échelle comparative de l'importance des émissions de CO₂ en annexe 1.1). En 2008 elles augmentent à 8 milliards de tonnes (Peters *et al.* 2011) pour un total mondial de 29 milliards¹, soit 37% d'augmentation relative des émissions incorporées au commerce sur la période. Sur ces émissions incorporées dans les échanges internationaux, une grosse partie est virtuellement échangée entre les PED et les pays de l'organisation pour le commerce et le développement économique (OCDE). En 1995, l'OCDE consomme 5% d'émission de plus qu'elle n'en produit. Autrement dit, 500 millions de tonnes de CO₂ (MtCO₂) ou l'équivalent de l'émission de l'Allemagne la même année, sont produits par les pays non OCDE et incorporées aux exportations vers l'OCDE (Ahmad 2003). Mais, à cette date les transferts nets d'émission entre PED et pays développés n'en sont qu'à leurs balbutiements. Atkinson *et al* (2010) découvrent qu'en 2004, un pays comme la Chine exporte dans le monde 35% de son émission de CO₂. Et qu'à l'inverse, en 2004 l'UE a consommé 32% de CO₂ de plus qu'elle n'en a produit.

Suivant la destination des émissions virtuellement incorporées aux exportations, des fuites de CO₂ vont alors apparaître. Quand l'Europe importe des produits depuis l'Asie, elle réduit son émission de CO₂ en évitant de produire sur son territoire, pourtant sa consommation ne se modifie pas. Dans cet exemple, que penser du transfert de la production européenne vers l'Asie ? Est-ce que l'Europe contribue réellement à réduire les émissions mondiales ?

Nous découvrons alors que les fuites de CO₂ posent un problème bien plus important, que le seul transfert de responsabilité dans l'émission de CO₂ entre un pays annexe B et un non annexe B. Nous savons que la grande majorité des pays non-annexe B accuse d'une différence technologique par rapport aux pays annexe B. Une différence qui se constate à tous les niveaux, dans la production d'énergie, dans l'utilisation de cette l'énergie pour créer de la richesse, et dans les circuits internes de production. En considérant que cette différence technologique est aussi

¹ Bases de données de l'agence internationale de l'énergie

une différence d'intensité² d'émission, si la demande en bien de consommation manufacturé d'un pays développé est satisfaite par un PED, qu'en est-il de la production de CO₂ ? N'est-elle pas plus élevée que dans le cas où le pays développé produirait lui-même sa demande ?

Le problème de fuite de CO₂ prend alors un niveau de complexité supérieur. En effet si un pays est contraint par le protocole de Kyoto à réduire ses émissions, qu'il le fait par une augmentation de ses importations depuis des pays non contraints, et que ces importations sont comparativement plus polluantes à une production nationale, alors la contrainte appliquée par le protocole n'a-t-elle pas l'effet inverse que celui recherché ? Cette vision est encore très peu exploitée par la littérature. En addition aux fuites de CO₂ elle pose un problème d'efficacité encore plus grand pour le protocole de Kyoto, **celui de la création de CO₂ par le commerce international**.

Aujourd'hui les politiques se trouvent dans un processus de recherche de nouvelles réglementations internationales. Nous voulons en particulier savoir si le protocole de Kyoto a été efficace ? Dans son objectif principal, soit de contenir l'augmentation des émissions des principaux pays développés, a-t-il été suffisant ? N'aurait-il pas fallu réduire les engagements, mais fortifier les fondations ? Actuellement le débat politique, mais aussi la recherche, porte sur une transformation totale de ces acquis considérés comme obsolètes. Une étude empirique sur l'efficacité des clauses du protocole de Kyoto pourrait alors être intéressante, dans le sens où elle permettrait de contribuer à l'augmentation de la connaissance existante des problèmes à ne pas répéter et des solutions à dessiner.

Pour étudier la création de CO₂ issu du commerce international, nous avons choisi l'étude de cas. Nous souhaitons analyser un cas de commerce bilatéral entre un pays annexe B au protocole de Kyoto, et un pays non annexe B. Ahmad *et al* (2003) découvrent dans leur étude qu'en 1995 la Chine exporte virtuellement 11,7% de son émission de CO₂ à l'étranger, mais ils avancent aussi qu'à la même année le second pays importateur de CO₂ au monde, est la France, avec 15% de différence entre CO₂ consommé et CO₂ produit.

² L'intensité d'émission de CO₂ est l'émission de CO₂ par unité de production. Nous préciserons cette définition dans la suite de l'étude.

À cette période les deux pays sont radicalement différents en ce qui concerne la technologie de production. La France est un pays à faible intensité d'émission de GES, cela s'explique à cause de la crise des années 1970 qui poussera le gouvernement à réduire la dépendance aux énergies fossiles du pays. À l'inverse, la Chine connaît une période de croissance sans précédent, et pour se développer elle utilise toutes les ressources qui sont à sa disposition, en particulier ses immenses réserves de charbon.

Nous souhaitons alors dans ce cadre restreint de commerce bilatéral, analyser les émissions incorporées aux échanges internationaux; étudier les fuites de CO₂; comptabiliser la création de CO₂ issue de ce cas de commerce; et par conséquent, réfléchir sur l'efficacité des clauses du protocole de Kyoto.

Une question particulière ressort de cette problématique, en effet, **dans le cadre restreint du commerce entre la France et la Chine, les clauses du protocole de Kyoto peuvent-elles être considérées comme efficaces ? Quels problèmes soulèvent-elles et quelles solutions peuvent être envisagées ?**

1.3 Cadre d'étude

D'un côté, nous étudions la France, pays annexe B du protocole de Kyoto qui doit sur la période 2008 à 2012 ne pas augmenter ses émissions de CO₂ au-delà des niveaux constatés en 1990. La France est la première nation nucléaire mondiale, sa production d'énergie électrique repose à plus de 75% sur la technologie nucléaire³ La France possède un système de production industrielle aux technologies modernes. La France est la 5e économie mondiale et elle peut être considérée comme l'un des principaux leaders en Europe. En 1990, la France a produit 399 MtCO₂ équivalent⁴ et en 2012⁵ on estime que son défi vis-à-vis de Kyoto est réussi⁶

³ Bases de données de l'institut national des statistiques et des études économiques

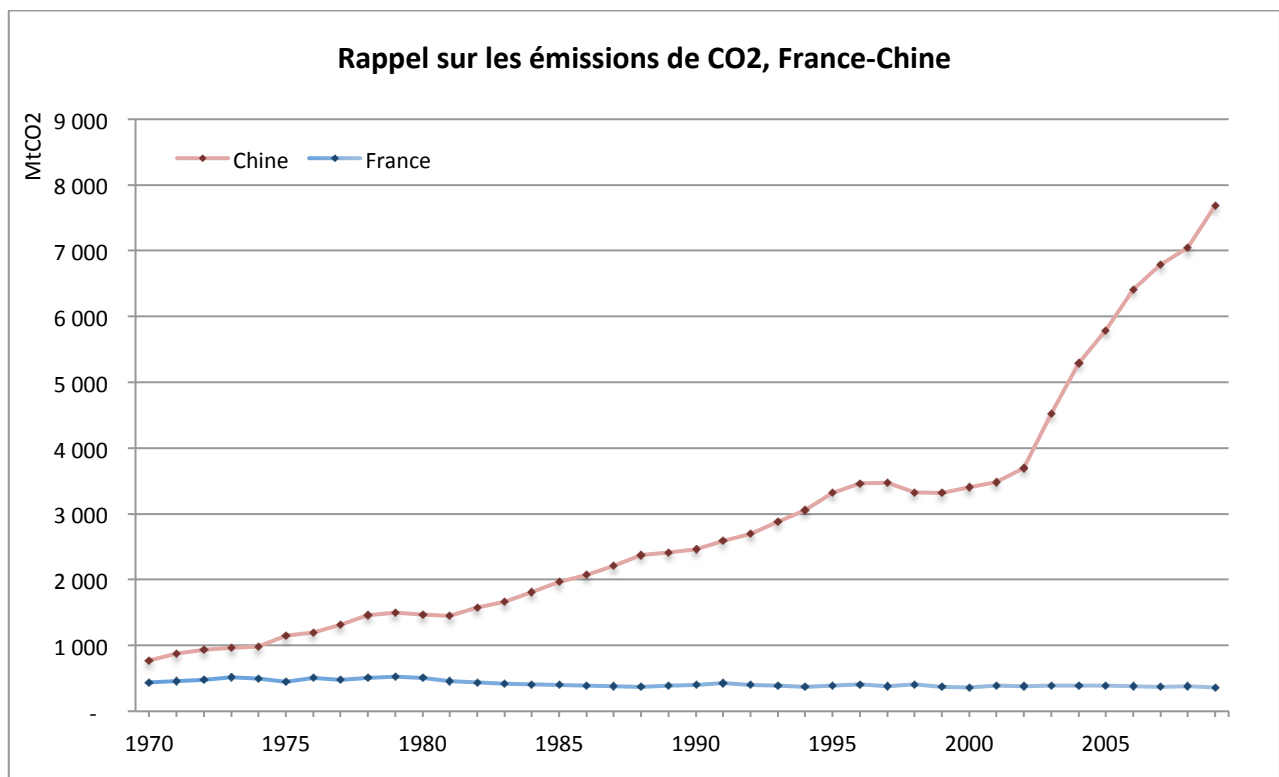
⁴ Equivalent-CO₂ désigne le potentiel de réchauffement global d'un GES, calculé par équivalence avec une quantité de CO₂ qui aurait le même potentiel de réchauffement global.

⁵ Données tirées des bases de données de OCDEstat

⁶ Données tirées des bases de données de Worldbank

De l'autre côté, la Chine est la seconde économie mondiale en terme de PIB, ainsi que le principal leader de la région Asie. Mais la Chine reste néanmoins un pays émergeant en matière de technologies industrielles, elle axe par exemple le développement de sa production d'énergie sur la consommation de Charbon; en 1996 plus de 71% de l'énergie provient du charbon⁷ Aujourd'hui en 2012, la production annuelle de CO₂ de la Chine est comprise entre 7 et 9 milliards de tonnes d'équivalent CO₂ et est en constante augmentation. Elle n'était que de 2,5 milliards en 1990⁸

Figure 1.1 Émissions de CO2 France - Chine (données en annexe 1.2)



La croissance du flux commercial entre la Chine et la France est exponentielle, 8,5 milliards de dollars en 1996, 21 milliards en 2003, et 52 milliards en 2009. En 2003 la part des produits chinois dans les importations française s'élève à 4,1% ce qui fait de la Chine le 7e partenaire

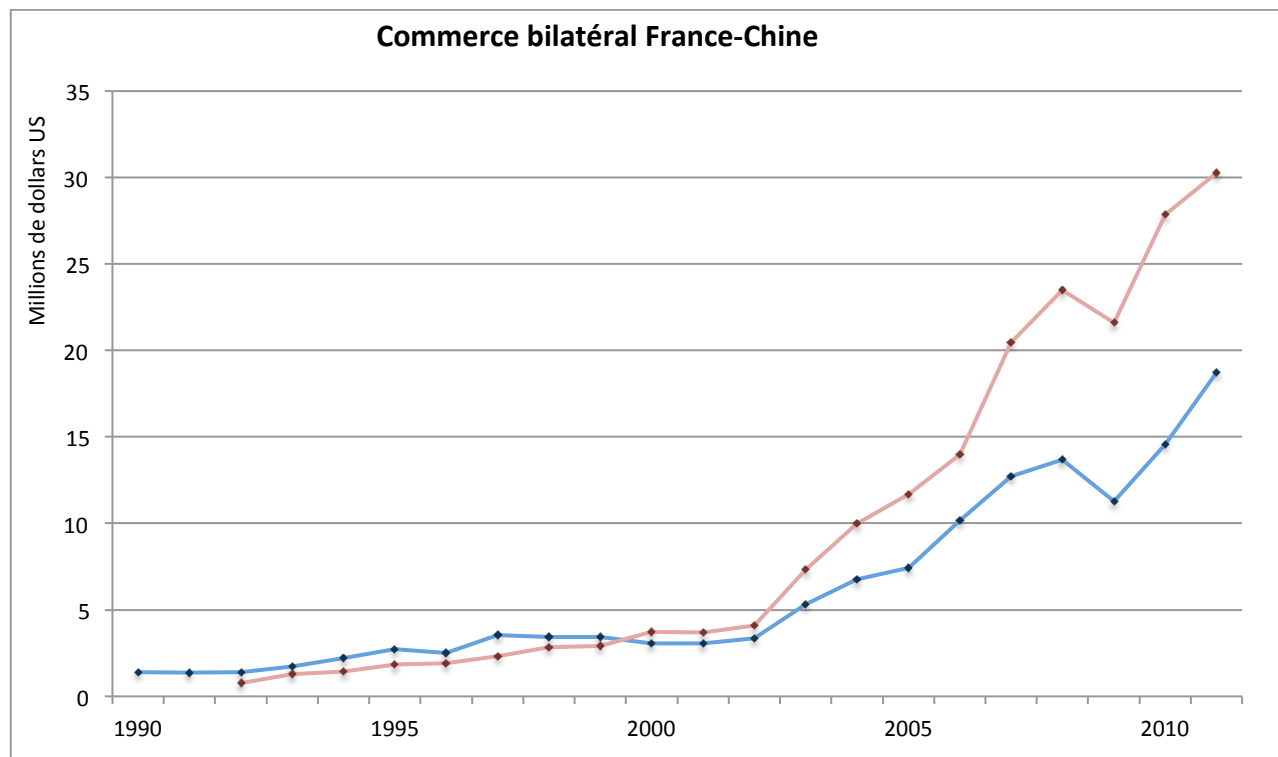
⁷ Données tirées du Bureau national des statistiques chinoises

⁸ Données tirées des bases de données de Worldbank

commercial français, derrière Allemagne (17,4%), le Benelux⁹ (10,2%), l'Italie (9,1%), l'Espagne (7,4%), le Royaume-Uni (6,6%), et les USA (6,6%). Par contre, exception faite des États-Unis, la Chine se place à la première position des partenaires français non annexe B (OCDE).

Enfin, Atkinson *et al* (2010) estiment que 35% des émissions chinoises de l'année 2004 sont exportées à l'étranger, cela représente 1,6 milliard de tonnes de CO₂. Ainsi, nous pouvons prévoir que le cadre France - Chine révélera une balance des émissions incorporées au commerce très intéressante qui nous permettra d'étudier les différents problèmes relatifs à la législation du protocole de Kyoto. L'utilisation d'un cadre d'étude restreint représente une contrainte pour l'analyse de l'efficacité du protocole de Kyoto. Cependant, nous verrons que ce choix a l'avantage d'apporter des mesures chiffrées d'une précision inégalée dans la littérature existante, de plus notre méthodologie peut facilement s'appliquer à d'autres cadres de commerce bilatéraux. Aussi, la discussion qui en découlera pourra alors aisément s'extrapoler à un ensemble de pays plus complet.

Figure 1.2 Commerce bilatéral France - Chine (France en bleu, Chine en rouge)



⁹ Belgique, Pays-Bas, et Luxembourg

Afin d'étudier dans sa globalité le cadre du commerce entre la France et la Chine, nous avons choisi de procéder à une analyse en trois temps. Dans notre première partie, nous utiliserons la structure de consommation énergétique, couplée aux Tableaux Entrées Sorties (TES) de la production domestique et au flux du commerce international, pour comptabiliser les émissions de CO₂ incorporées au commerce bilatéral entre la France et la Chine. Nous utiliserons des données de production sectorielle très détaillées (22 secteurs, 20 énergies) qui nous permettra d'étudier aussi bien le commerce dans sa globalité que des échanges sectoriels spécifiques. Ce premier travail d'analyse nous permettra d'obtenir des comparaisons intersectorielles et intertemporelles de l'intensité d'émission de CO₂ des deux pays. Nous pourrons alors réaliser une balance des émissions incorporées au commerce (BEET), et commencer à réfléchir sur le rapport existant entre commerce et environnement.

Dans un second temps, et grâce à des données en panel (de 1996 à 2003), nous réaliserons de façon dynamique une Analyse de décomposition structurelle (SDA) de la variation de ces agrégats. Nous utiliserons une méthode de décomposition par pondération logarithmique des facteurs explicatifs, la Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) décrite dans Ang (2005) qui nous permettra de mesurer l'apport environnemental du changement de nombreux facteurs économiques tels que : 1) l'innovation technologique; 2) la modification de la structure d'input en combustible; 3) les avancées en matière de production d'énergie propre; 4) la modification de la structure de production de l'économie; 5) les changements provoqués par divers types d'externalités économiques interindustrielles; 6) La variation de la demande internationale; 7) La variation de la composition des exportations. Cette partie poussera l'analyse dans un niveau de précision et de complexité supérieur, en effet avoir une image du commerce entre deux nations, n'informe pas sur la façon dont les données varient dans le temps, ni sur les causes de leurs variations. Obtenir ces informations est primordial pour quiconque voudrait trouver une solution durable aux problèmes d'émissions de CO₂ incorporées au commerce.

Enfin pour la dernière partie nous analyserons comment et dans quels cas le commerce peut augmenter l'émission mondiale de CO₂. Nous observerons en particulier de façon directe que le commerce peut alors créer de la pollution, mais qu'il peut aussi réduire les émissions de CO₂. En

utilisant les connaissances développées dans les premières parties, ainsi que celles de la littérature existante, nous proposerons en guise de fin une discussion complète sur des solutions permettant de répondre au problème d'efficacité du protocole Kyoto.

1.4 Plan de l'étude

L'étude prend appui sur une revue de littérature complète (chapitre 2) dans laquelle nous poursuivrons trois objectifs. Premièrement, nous souhaitons retracer les principales théories qui lient commerce et environnement (section 2.1). Puis, nous présenterons une image précise des émissions de CO₂ incorporées au commerce mondial (section 2.2). Enfin, nous discuterons des différentes méthodologies sur lesquelles ce mémoire s'est construit (section 2.3).

L'analyse débute par *la BEET France-Chine* (chapitre 3). Nous commencerons par une courte description des données utilisées (section 3.1). Puis, nous développerons la méthodologie (section 3.2). Enfin, nous présenterons les résultats de l'étude complète de la BEET France-Chine (section 3.3).

Le mémoire continue avec une étude beaucoup plus profonde et complexe, *la SDA* (Chapitre 4). La première partie présentera le traitement des données (Section 4.1). Ensuite, nous adapterons la méthodologie de la LMDI à notre cas d'étude (Section 4.2). Enfin, après une présentation des résultats généraux, nous nous concentrerons sur une sélection des résultats les plus pertinents (Section 4.3).

Dans le dernier chapitre de l'analyse la réflexion sur *les conséquences du commerce* fera plus office de réflexion politique que d'analyse mathématique pure (Chapitre 5). Nous débiterons par une exploration des conséquences environnementales du commerce entre la France et la Chine (Section 5.1). Puis nous discuterons de solutions inspirées de la littérature pour remédier aux problèmes actuels du protocole de Kyoto (Section 5.2). Enfin nous conclurons l'étude.

2 Revue de littérature

Le débat sur le rôle que joue le commerce international dans la détermination des problèmes environnementaux génère en ce moment plus de chaleur que de lumière.

Antweiler et al (2001)

2.1 Le commerce et la pollution

Dans le cadre des négociations de l'accord de libre-échange nord-américain (ALENA), Grossman et Krueger (1993) avancent qu'un lien de causalité entre le commerce et l'environnement existe. En effet, selon la théorie des avantages comparatifs de Ricardo, l'ALENA pousserait le Mexique à délocaliser sa production de biens intensifs en capital aux États-Unis et au Canada. Comme ces industries sont aussi intensives en pollution, et que les pays industrialisés sont généralement plus performants en matière environnementale, l'ALENA provoquerait une baisse globale des émissions polluantes. Cependant, les travaux postérieurs à Grossman et Krueger montrent que la relation qu'ils exposent est loin d'être complète.

Comment l'ouverture au commerce influence-t-elle la pollution ? Le commerce est-il bon ou mauvais pour l'environnement ? Existe-t-il des pays spécialisés dans les biens polluants, et d'autres qui profitent d'un système de passager clandestin ? Depuis seulement quelques années, ces très nombreuses questions agitent la communauté scientifique. Entre antagonismes, ententes et raccords, nous avons souhaité exposer les causalités les plus consensuelles afin de construire les premières intuitions qui guideront notre étude.

Antweiler *et al* (2001) développent un modèle intuitif qui servira de référence à de nombreux auteurs. Le commerce et l'environnement seraient liés par trois effets distincts aux variations contradictoires. **1) L'effet d'échelle** qui lie la croissance de la pollution avec la croissance du commerce. **2) L'effet technique** qui lie la diminution de la pollution avec la croissance du progrès technologique entraîné par le commerce. **3) L'effet de composition** qui implique que la pollution varie en fonction des variations de la composition de l'output commercial. Ces trois effets sont largement acceptés par la communauté scientifique, pourtant leur interaction reste sujette à débat.

Par exemple, il existe un consensus sur le signe de l'effet d'échelle, mais sa magnitude reste contestée, notamment à cause de son impact sur les deux autres effets. La croissance des échanges commerciaux accroît la production, et par conséquent la pollution, mais elle accroît aussi le revenu, contribue à la recherche, au développement, et au partage des connaissances. Les méthodes de production s'améliorent et c'est ainsi que l'effet technique baisse les niveaux de

pollution et contrecarre l'effet d'échelle.

On peut aussi considérer que l'amélioration technologique va rendre un pays plus compétitif au niveau international, les exportations vont s'accroître davantage, et alors l'effet technique provoquera un effet d'échelle qui va augmenter les niveaux de pollution. Enfin, la croissance du commerce international (effet d'échelle), ou l'amélioration de la technologie (effet technique) vont redéfinir les structures productives en déplaçant le capital suivant la théorie Heckscher-Ohlin conventionnelle. L'output des pays va se modifier et par le biais de l'effet de composition les niveaux de pollution peuvent aussi bien diminuer qu'augmenter.

La relation entre commerce et environnement via l'interaction des trois effets est donc difficile à représenter. Les auteurs vont alors utiliser l'outil empirique pour valider les intuitions théoriques. À ce titre, Antweiler *et al* (2001) montrent que lorsque la croissance des échanges internationaux augmente l'output et le revenu du pays de 1%, alors les niveaux de concentration de la pollution au dioxyde de soufre (SO₂) vont augmenter de 0,5 à 1% via l'effet d'échelle, mais diminuer de 1% à 1,5% via l'effet technique. Ainsi, selon les auteurs les deux premiers effets s'annuleraient, et l'ouverture au commerce international serait considérée comme bonne pour l'environnement.

Par la suite, plusieurs auteurs découvrent que d'autres facteurs influencent les trois effets. Liddle (2001) avance que les niveaux de pollution sont effectivement influencés par l'ouverture au commerce, mais que la magnitude et le signe des effets dépendent aussi des dotations de base des pays. Pour Cole et Elliott (2003) la magnitude et le signe dépendent du type de pollution étudié (SO₂, CO₂, NO_x, ...), et de la mesure utilisée (Per capita, ou émissions globales). Pour Managi *et al* (2009) il faut aussi prendre en compte la période de temps et les pays. Les résultats d'Antweiler *et al* (2001) seraient limités, et l'augmentation des revenus du commerce qui diminue bien la concentration de SO₂ augmenterait la pollution au CO₂ et au NO_x.

Plus tard, Copeland et Taylor (2004) montrent que la littérature avance de plus en plus le rôle de la législation dans la détermination du lien entre commerce et environnement. À ce propos, He (2005) étudie la relation entre commerce et ambitions gouvernementales chinoises. L'auteur mesure une baisse de 0.071% de la pollution au dioxyde de soufre (SO₂) dans le cas d'une

augmentation de 1% de l'intensité des exportations chinoises par rapport au PIB. Mais à l'inverse, quand la Chine augmente ses importations, la pollution augmente de 0.22%. Pour He (2005) les exportations chinoises de biens intensifs en main d'œuvre apportent un revenu qui va réduire la volonté du gouvernement à développer l'industrie lourde et intensive en pollution. Au contraire, lorsque la demande intérieure est comblée par l'étranger, le gouvernement ré-axe sa politique sur le développement industriel qui provoque une augmentation du niveau de la pollution. Le facteur de la législation et de l'influence des gouvernements prend ici tout son sens, mais le type de pays doit être aussi pris en compte.

Un pays à la législation environnementale faiblement contraignante pourrait-il être la cible de plus d'investissement dans les industries lourdes ? Ou d'un accroissement de ses exportations de biens intensifs en pollution (Frankel et Rose 2003) ?

He (2006) montre que la régulation environnementale a bien un impact sur l'entrée des investissements qui vont alors se concentrer sur des secteurs à faibles régulations. Ce résultat est confirmé par Kellenberg (2008) et Managi *et al* (2009) qui avancent que les pays très riches ont tendance à voir leur niveau de pollution baisser avec l'ouverture au commerce, alors que la libéralisation sur les PED comme la Chine a l'effet inverse. Le cas du commerce entre la France et la Chine pourrait-il refléter ces conclusions ?

Le libre échange est-il bon pour l'environnement ? Beaucoup d'études suggèrent que l'effet est petit, mais une réponse à cette question nécessiterait un travail empirique guidé par la théorie plus attentif. Le commerce affecte l'environnement via l'effet d'échelle, de composition et technique, et on peut s'attendre à ce que ces effets varient dépendamment des pays

Copeland et Taylor (2004)

Les grands principes de la relation entre commerce et environnement sont connus, mais l'évaluation des trois effets est confuse. Notamment, à cause de l'impact variable de nombreux facteurs sur la relation. Dans ce mémoire nous concentrons l'analyse sur un facteur d'interaction particulier : le commerce bilatéral entre un pays développé et un PED. Nous apporterons entre autres de la précision à la théorie en ciblant la partie de pollution directement provoquée par le commerce et en isolant l'impact des trois effets sur cette pollution.

2.2 Les émissions de CO₂ incorporées au commerce.

Comment cibler la partie de pollution directement provoquée par le commerce ? La suite de l'étude portera exclusivement sur l'analyse des *émissions de CO₂ incorporées au commerce*. Cette méthodologie utilise les théories d'interactions sectorielles de Leontief et Ford (1970) pour mesurer l'émission de CO₂ totale nécessaire à l'exportation d'un bien particulier. C'est à notre connaissance l'une des mesures la plus développée, qui est utilisée par une très large littérature, et qui en outre pourra facilement faire l'objet d'une analyse de la relation entre commerce et environnement.

Les émissions incorporées font référence, au dioxyde de carbone, ou à tout autre gaz à effet de serre, émis durant toutes les étapes de production d'un bien manufacturé. Depuis l'extraction des minerais, au service de distribution et de transport, jusqu'à la consommation finale.

Kejun et al (2008)

En effet, l'avantage de cette méthodologie par rapport aux modèles théoriques classiques est sa grande précision. Nous pourrions ainsi cibler exclusivement les émissions de CO₂ provoquées par le commerce, puis, remonter entièrement le cycle de production pour isoler les trois effets théoriques dans le cadre d'un commerce exclusivement bilatéral.

Avant d'entrer dans le détail de la méthodologie (qui fait l'objet de la section 2.3) nous voulons toutefois développer une image précise des émissions incorporées aux exportations mondiales (**Section 2.2.1**). Mais aussi nous approprier le sujet en exposant les connaissances sur les émissions et le rôle des trois effets dans le commerce chinois (**Section 2.2.2**). Enfin, nous terminerons par le cas de la France, pays très peu étudié par la littérature sur les émissions incorporées au commerce (**Section 2.2.3**).

2.2.1 Aperçu global des émissions incorporées au commerce.

Les flux de CO₂ qui parcourent le monde sont très importants, il est difficile d'estimer avec précision quelle quantité de CO₂ est incorporée à la consommation des pays développés. Avec des données datées de 1995, l'article d'Ahmad et Wyckoff (2003) fait un rapport complet sur les émissions incorporées aux biens échangés de par le monde. La première conclusion du rapport est que les émissions consommées (GES des biens et services produits + importations - exportations)

par les pays de l'OCDE sont estimées à 12 milliards de tonnes (Gt) de CO₂ en 1995, ce qui est 500 Mt de plus que la production de CO₂ de l'OCDE (11,5 GtCO₂). Autrement dit, les pays de l'OCDE importent virtuellement plus de CO₂ qu'ils n'en exportent dans les pays non OCDE. L'auteur remarque qu'il y a 5% d'amplitude entre émissions de CO₂ produites et consommées par l'OCDE, soit l'équivalent de l'objectif fixé par le protocole de Kyoto pour les années 2008 à 2012 : une réduction moyenne de 5% des émissions de CO₂.

Dans le détail des pays aux BEET déficitaire, la seconde position juste derrière le Japon est détenue par la France, avec 15,1% d'amplitude entre CO₂ consommé et CO₂ produit. Le Japon obtient 17,0%; il est suivi de la Suède (13,5) de l'Italie (11,9), de la Corée du Sud (10,4), de l'Espagne (7,2), de l'Allemagne (7,1) et des États-Unis (4,9). De l'autre côté de la balance, les pays aux BEET positives vont exporter leurs émissions virtuelles de CO₂. Nous retrouvons la Chine en quatrième position avec une amplitude de 11,7% de différence entre CO₂ produit et CO₂ consommé. Les trois premières places sont pour la République tchèque (20,1), la Russie (16,1), et la Pologne (12,7).

Grâce à des données de 2004, soit 10 ans plus tard, Atkinson *et al* (2010) renouvèlent l'expérience et développent les balances d'émissions de CO₂ des plus gros acteurs mondiaux. Sans surprise suite à son entrée à l'OMC en 2001, la Chine passe en tête des exportateurs de CO₂. En 2004, l'amplitude entre sa consommation et sa production est alors estimée à 35%. Ainsi, 22% du CO₂ exporté par la Chine va en Europe, 20% aux USA, et 13% au Japon. Tout le contraire de l'Union Européenne qui consomme en moyenne 32% de CO₂ de plus qu'elle n'en produit. Nous pouvons alors noter que le déficit ou l'excédent des BEET s'est durement amplifié avec le temps. Ces tendances sont confirmées par l'étude de Chen et Chen (2011) qui va comptabiliser les émissions incorporées aux balances des coalitions du G7, des BRICS, et du reste de monde. Chen et Chen (2011) trouvent que le G7 possède un surplus de 1,53 GtCO₂, soit l'équivalent de 36% de ses émissions incorporées au commerce. Les BRICS ont un déficit estimé à 1,37 GtCO₂ (51% de leurs émissions échangées) et le reste du monde 160 MtCO₂, soit 3% de leurs émissions échangées.

De façon plus détaillé l'étude de Carbon Trust (2011) indique qu'en 2004 les émissions de CO₂

consommées par les Français sont alors 43% plus élevées que leur production, la Suède première mondiale compte des émissions 61% plus élevées que sa production. Carbon Trust relativise la forte augmentation française et suédoise par le fait que les pays disposent de l'une des économies les moins intensives en carbone, quel que soit le partenaire commercial, celui-ci sera forcément plus polluant.

Ces données sont confirmées par Atkinson *et al* (2010); les émissions incorporées au commerce ne sont pas seulement des balances relatives, mais aussi du volume. Dans cette catégorie les États Unis sont les leaders incontestés de l'importation d'émissions de CO₂. Ils importent en 2004 plus d'un milliard de tonnes et n'exportent que 500 MtCO₂. La Chine quant à elle exporte 1,4 GtCO₂ pour une importation de 300 MtCO₂. Enfin suivant les résultats de Carbon Trust l'Europe reste encore en tête puisque 8% des flux intercontinentaux de CO₂ partent de la Chine vers l'Europe, 6% de la Russie vers l'Europe, 5% du reste de l'Asie vers l'Europe, 4% de l'Amérique du Nord vers l'Europe, et 4% de l'Afrique vers l'Europe. Cela représente environ 1,25 GtCO₂ importé en Europe, contre à peine 150 MtCO₂ exportées (principalement en Amérique du Nord le reste étant marginal).

Pour finir, une étude plus récente de Peters *et al* (2011) étudie l'évolution du carbone incorporé au commerce depuis 1990 jusqu'à 2008. Les résultats qui couvrent 113 pays semblent indiquer que les émissions échangées via le commerce international sont passées de 4,3 GtCO₂ (20% des émissions totales) à 7,8 GtCO₂ (26%) de la période 1990 à 2008. Et plus alarmant les transferts nets d'émissions, ou fuites de CO₂, depuis les pays en voie de développement vers les pays développés, passent de 400 MtCO₂ en 1990 à plus de 1,6 GtCO₂ en 2008. Pour situer ces chiffres, l'objectif du protocole de Kyoto correspondrait à une réduction moyenne de 700 MtCO₂ par an sur la période 1990 à 2012. Avec plus de 16 GtCO₂ accumulées entre 1990 et 2008, les fuites de CO₂ du commerce international dépasseraient déjà l'objectif du protocole de Kyoto. Peters *et al* (2011) avancent que si les tendances se confirment, en 2020 les fuites de CO₂ atteindront 2,3 GtCO₂ par an, soit l'équivalent de 16% des émissions des pays annexe B en 1990.

2.2.2 Focus sur la Chine

Depuis les réformes débutant fin 1970 la Chine a bénéficié d'un très fort taux de croissance et

l'expansion de ses exportations dépasse largement la croissance du PIB. Son taux de croissance du commerce double après son adhésion à l'OMC passant alors à plus de 28% d'augmentation par an sur les années 2002 à 2007 (Wei *et al* 2011, Liu *et al* 2010). Cette forte croissance du commerce n'est donc pas sans conséquence; en effet la Chine est peut-être le plus gros exportateur mondial, mais elle est aussi la plus grosse exportatrice de CO₂ mondiale selon Atkinson *et al* (2010).

En effet de 2002 à 2005, Du *et al* (2011) calculent que les émissions exportées nettes par la Chine vers les USA passent de 387 à 864 MtCO₂. Elles diminueraient ensuite à 792 MtCO₂ en 2007. Atkinson *et al* (2010) parlent de 1,1 GtCO₂ exportées dans le monde pour l'année 2004, et Pan *et al* (2008) annoncent 1,6 GtCO₂ pour l'année 2006.

La Chine est un pays aux technologies de production très polluantes, en particulier 70% de sa production d'électricité provient de l'utilisation du charbon. Pour autant la Chine s'améliore très vite dans l'efficacité énergétique et donc réduit son intensité d'émission de CO₂ via la technologie. He (2010) découvre que les avancées techniques ont permis de réduire de 245% les émissions de SO₂ industrielles de la Chine entre 1991 et 2001. Cependant, ces améliorations ne sont pas suffisantes en comparaison à un effet d'échelle et un changement de composition de l'économie qui les augmente de respectivement 256% et 119%.

Xu *et al* (2011) réalisent le même exercice pour les émissions incorporées dans le commerce de la Chine, et il s'avère que les résultats sont plus marquants. Entre 2002 et 2007 les améliorations d'intensité ont réduit de 588% les émissions de CO₂ incorporées aux exportations chinoises. Cependant encore une fois l'amélioration de l'intensité d'émission ne suffit pas à contrebalancer les effets de l'augmentation en volume du commerce (+701%), et celles de la modification de la composition du commerce (+209%). Xu *et al* (2011) avancent par exemple que l'augmentation de l'industrie des métaux et des équipements électroniques contribue principalement à la modification de composition du commerce. La proportion de ces deux secteurs intensifs en carbone dans les exportations a augmenté respectivement de 60% et 25%, alors que la part des secteurs chinois peu intensifs en carbone comme l'agriculture ou les textiles a été réduite de respectivement 45% et 30%.

Du *et al* (2011) étudient le commerce entre la Chine et les USA. Les auteurs montrent que les augmentations de CO₂ incorporé au commerce s'expliquent par la composition du commerce. L'auteur indique dans ses principaux résultats que la plupart des émissions incorporées au commerce viennent des industries lourdes, dont l'expansion du volume suivi par la structure des consommations intermédiaires (CI) ont considérablement fait augmenter les émissions incorporées au commerce (respectivement +104% et +33%), contrairement aux baisses d'intensités des mêmes secteurs qui avec une baisse de 40% des émissions ne suffisent pas à réduire le volume de pollution incorporé au commerce.

Pour conclure, Pan *et al* (2008) développent dans leur étude un modèle qui indique qu'entre 2001 et 2006 la croissance de la production de CO₂ chinoise serait de 12,5% par an, alors que la croissance de la consommation de CO₂ chinoise de seulement 8,7% par an. En 2006 la Chine aurait produit 5,5 milliards de tonnes de CO₂, pour n'en consommer réellement que 3,8. Pour Pan *et al* (2008) le constat est clair, il existe une faille dans la crédibilité des pays qui réduisent leurs émissions de CO₂ en les déplaçant vers la Chine. Pour lui la Chine et les pays nets exportateurs de carbone devraient faire l'objet d'une distribution d'abattements post-Kyoto.

2.2.3 Le cas de la France

Contrairement à la Chine, la littérature sur les émissions incorporées française est incroyablement pauvre. Si bien que nous n'avons pu trouver aucun document étudiant spécifiquement le cas des émissions de CO₂ incorporées au commerce français. Bien souvent la France est agrégée dans l'Europe et alors un problème se pose quant à la différenciation et l'analyse de politiques énergétiques. La plupart des études considèrent une technologie de production similaire entre puissances Européennes comme l'Allemagne, le Royaume-Uni, l'Espagne ou l'Italie, avec la France. Pourtant, ces pays utilisent une structure d'input en énergie radicalement différente de la structure française.

L'économie française fut sévèrement affectée par le choc pétrolier de 1970, si bien que le gouvernement prit d'importantes mesures afin de restructurer la politique énergétique française. Le gouvernement dirigea entre autres le développement de l'énergie nucléaire pour la production

d'électricité, aussi une partie de la consommation de pétrole fut substituée par le gaz naturel, et enfin d'importantes réformes d'efficacité énergétiques ont été prises. Selon Ang (2007) grâce à ces changements les émissions per capita françaises diminuent depuis 1979, environ 1,5% par an. La France est maintenant le pays le moins polluant en terme d'émissions de CO₂ des principaux pays d'Europe de l'Ouest.

La principale caractéristique de la France qui la distingue donc de ses partenaires européens est la génération d'électricité par la technologie nucléaire. Ahmad et Wyckoff (2003) publient en annexe de leur papier les résultats de leur recherche concernant la pollution induite par l'utilisation de l'électricité. Il s'avère qu'en 1995 l'amplitude de la différence d'émission de CO₂ par téra watt heure (TWH) entre la France et la Chine est la seconde plus importante mondiale. La France se place en seconde position derrière la Norvège avec une émission de 0.04 Mt de CO₂ par TWH, alors que la Chine est dernière tout comme l'Australie avec 0,75 Mt de CO₂ par TWH. Ainsi en France 5% des émissions domestiques de CO₂ proviennent de l'électricité, alors qu'en Chine c'est 39%.

2.3 Méthodologies utilisées dans l'étude

Afin d'atteindre les objectifs de notre étude, nous avons dû réaliser un long travail de sélection des méthodologies. En premier lieu, nous étudierons la littérature existante sur les différentes méthodologies de comptabilisation des émissions incorporées au commerce international (**Section 2.3.1**). Ensuite, notre étude faisant l'objet d'une SDA, nous étudierons les nombreuses méthodologies de décomposition (**Section 2.3.2**). Enfin, pour mener une discussion sur les failles du protocole de Kyoto complète, nous ferons une revue de la littérature existante sur l'attribution des responsabilités dans l'émission de CO₂ (**Section 2.3.3**)

2.3.1 Méthodologie de la BEET

Le principe fondamental du calcul des émissions de CO₂ incorporées au commerce international est de multiplier, respectivement, l'énergie totale et l'intensité en carbone par les vecteurs d'importation ou d'exportation

Machado et al (2001)

La méthodologie mathématique du calcul des émissions incorporées au commerce international est similaire d'une étude à l'autre. Nous devons disposer de TES, de tables de consommations énergétiques ou flux de CO₂, puis des données du commerce international. La disponibilité des données diffère radicalement d'une étude à l'autre (Su *et al* 2010) et l'objectif que les auteurs souhaitent accomplir grâce à l'analyse des émissions incorporées se voit souvent contraint par la quantité de données. Machado *et al* (2001) remarquent à ce sujet que les méthodes dépendent donc du type d'étude, selon que l'on veut étudier **i) les études globales** (qui concernent plusieurs pays), ou **ii) le cas du commerce d'un pays en particulier**. Ajoutons à ces deux catégories une troisième : **iii) l'analyse du commerce bilatéral entre deux régions ou deux pays du monde**.

i) Les études globales

Nous entendons par études globales les papiers qui tentent d'analyser l'ensemble des émissions incorporées du commerce international mondial (Subal 1995, Muradian *et al* 2002, Ahmad et Wyckoff 2003, Aktinson *et al* 2010, Wilting et Vringer 2010, Chen et Chen 2011, Davis *et al* 2011, Peters *et al* 2011, Stratford et Nishioka 2012). Selon Machado *et al* (2001), la littérature existante est plutôt pauvre en études globales car ce type d'étude est limité par la quantité de données disponibles. En effet, il faudrait couvrir les échanges de tous les pays, avec tous les autres pays, ce qui nécessite des ressources en données très importantes, ou alors des hypothèses très fortes qui rendent les résultats moins fiables. Nous avons déjà fait dans la partie précédente (Section 2.2.1) une revue de la littérature existante sur les résultats des études globales. Mais quelle est la méthodologie utilisée dans chaque étude? Est-elle fiable ?

Pour la plupart des cas que nous avons étudié, les études de CO₂ incorporé au commerce global souffrent de la disponibilité des données utilisées. Par exemple, Ahmad *et al* (2003) souhaitent connaître les principaux flux de CO₂ à travers le monde. Par manque de données les auteurs constatent de nombreux problèmes de consistance. 1) Ahmad *et al* (2003) n'utilisent que les données sectorielles d'émission de CO₂ de 24 pays à des années variant entre 1995 et 1998. Ils corrigent ce problème grâce à l'utilisation de déflateurs, et avec l'hypothèse que la croissance est linéaire dans tous les pays pour ces années; 2) Les tarifs douaniers et taxes aux frontières ne sont pas supprimés des données qu'ils utilisent, les auteurs prennent alors pour hypothèse qu'en cas d'importation le prix est surévalué de 10%, somme censée représenter une moyenne mondiale des

tarifs douaniers; 3) Les matrices input-output de 16 pays n'étaient pas disponibles, les auteurs ont donc pris l'hypothèse d'une structure économique similaire avec les pays dont les matrices sont disponibles, par exemple le reste du monde utilise la matrice des États Unis.

D'autres problèmes de consistance sont à relever dans l'étude de Ahmad *et al* (2003), parce que les auteurs souhaitent une étude globale, 4) ils sont confrontés à la variabilité de la comptabilisation de l'énergie autoproductrice par les entreprises, le répertoire des autoproducteurs est en effet différent suivant les pays; 5) celle du commerce du reste du monde avec Hong Kong : certains pays déclarent les importations provenant de Chine, d'autres de Hong Kong; 6) Le problème de la non-incorporation de l'électricité dans le commerce. En effet sur ce dernier point, les auteurs remarquent que dans certains pays l'électricité est très intensive en énergie mais très peu échangeable de façon internationale, elle ne pourra malheureusement pas être incorporée aux émissions. Les auteurs nous renseignent alors sur les différences entre les pays grâce à une table annexe, où l'on peut remarquer que l'électricité issue de Chine ou d'Australie compte pour respectivement 39% et 46% des émissions domestiques, alors qu'au Brésil ou en Norvège l'électricité est responsable de seulement 4% et 1% des émissions.

Ces problèmes ne sont qu'en partie résolus dans les autres études; par exemple Atkinson *et al* (2010) utilisent dans leur article une base de donnée bien plus complète. Elle totalise 106 pays et 57 secteurs, les auteurs réduiront les informations à 15 régions et 19 secteurs pour apporter plus de lisibilité à l'étude. Cependant, les auteurs ne spécifient pas comment ils traitent le problème de l'intégration de l'électricité, ou celui des tarifs douaniers. Retenons que les résultats des études globales sur les flux de CO₂ incorporés au commerce souffrent d'incertitude, et font difficilement l'objet d'analyses poussées comme des SDA, ou des analyses temporelles.

ii) Les études nationales

Les études nationales qui axées sur le commerce d'un pays particulier avec le reste du monde sont nombreuses. (Machado *et al* 2001, Munksgaard et Pedersen 2001, Sanchez-Choliz et Duarte 2004, Peters et Hertwich 2006, Mäenpää et Siikavirta 2007, McGregor *et al* 2008, Pan *et al* 2008, Kratena et Meyer 2010, Lin et Sun 2010, Liu *et al* 2010, Munoz et Steininger 2010, Serrano et Dietzenbacher 2010, Su *et al* 2010, Yunfeng et Laike 2010, Peter *et al* 2011, Vetone 2011, Wei *et al* 2011, Xu *et al* 2011, Böhringer *et al* 2012, Vetone 2013). Ce type d'étude est dans la

méthodologie identique à celle des études globales, néanmoins étudier un seul pays est moins contraignant en termes de quantité de données à utiliser.

Concernant les études à caractère global ou national, les auteurs utilisent le plus souvent des modèles d'entrées-sorties multirégionaux (MRIO). L'avantage du modèle MRIO est qu'il retrace l'origine des CI étrangères utilisées dans la production, il est alors possible de retracer l'interdépendance des échanges entre les différents pays, et de mener une analyse d'intensité d'émission de CO₂ plus précise (Peters 2008). Par contre, ce type de modèle nécessite beaucoup plus de données que le modèle d'entrée sortie simple région (SRIO) développé par Leontief. Le travail de récolte et de mise en place des données est selon Wiedmann *et al* (2007) la plus grosse difficulté d'un travail MRIO. C'est aussi pourquoi ce type de modèle souffre souvent d'inconsistance.

Par exemple, Serrano et Dietzenbacher (2010) cherchent dans leur étude à comparer plusieurs approches de la responsabilité de l'Espagne à l'égard des émissions de 9 gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O, SF₆, HFCs, PFCs, SO₂, NO_x, NH₃) pour les années 1995 et 2000. Les auteurs considèrent dans le modèle seulement deux régions : l'Espagne et le reste du monde. Chaque région possède une technologie et un modèle de pollution indépendant. Kratena et Meyer (2010) étudient le cas de l'Australie depuis 1995 jusqu'en 2005, ou Machado *et al* (2001) avec le cas du Brésil utilisent aussi la même méthodologie. Dans les trois modèles, la seconde région (le reste du monde) se voit appliquer arbitrairement un taux d'intensité d'émission de CO₂ moyen.

Ces études considèrent alors que les importations du pays étudié ont toutes été produites avec la même intensité d'émission, et la même structure input-output. Ce type de méthodologie se trouve alors vite limité dans la qualité des résultats. En ne prenant pas en compte les différences technologiques des partenaires commerciaux, il est impossible de savoir avec quelle région du monde la BEET est déficitaire, et avec qui elle est excédentaire.

Une solution pour régler ce problème est d'augmenter le nombre de régions. Peters et Hertwich (2006) vont utiliser 8 régions étrangères pour étudier les émissions de gaz à effet de serre incorporées dans la balance commerciale de la Norvège. Les auteurs font la distinction entre

l'intensité d'émission norvégienne, l'intensité d'émission des 7 plus gros partenaires norvégiens¹⁰, et celle du reste du monde qui est évaluée en fonction des technologies des principaux partenaires¹¹. Grâce au relâchement de l'hypothèse d'une technologie similaire, les auteurs découvrent que la moitié des émissions de CO₂ provient de pays en voie de développement (ils ne représentent pourtant en valeur que 10% de la part des importations de la Norvège). Les résultats deviennent alors plus consistants, mais le travail de récolte de données est exponentiellement plus contraignant.

iii) Les études bilatérales

Nous en venons à la dernière de nos trois catégories d'études, les analyses bilatérales. Plusieurs auteurs ont travaillé sur ce type d'analyse (Mongelli *et al* 2006, Shui et Harriss 2006, Ackerman *et al* 2007, Li et Hewitt 2008, Peters 2008, Dong *et al* 2010, Guo *et al* 2010, Xianbing *et al* 2010, Du *et al* 2011, Edens *et al* 2011, Ferguson et MacLean 2011, Su et Ang 2011). Il s'avère que la méthodologie entre une analyse bilatérale et une analyse nationale diffère quelque peu.

Su et Ang (2011) et Peters (2008) vont faire la distinction entre la méthodologie d'analyse MRIO et celle des émissions incorporées au commerce bilatéral (EEBT) qui est quant à elle une combinaison de deux modèles entrée sorties simple régions (SRIO). L'EEBT applique un modèle SRIO au pays étudié, et un au partenaire. Les exportations vers les partenaires sont alors toujours en demande finale, on ne distingue donc pas celles qui sont ensuite réutilisées dans la production. Cependant, la structure de production et la technologie bénéficient d'une meilleure précision et transparence que dans le modèle multi-région (Peters 2008). Su et Ang (2010) découvrent que les deux méthodologies offrent des résultats différents lors des analyses de responsabilité consommateur, ou producteur, ils considèrent l'approche EEBT comme plus transparente, et donc meilleure pour l'analyse des politiques climatiques ou du commerce.

C'est une veille vérité de dire qu'il n'existe pas de modèles meilleurs en tant que tels, mais de modèles meilleurs pour une utilisation précise

Wiedmann et al (2007)

¹⁰ Ils représentent près de 61% des échanges : la Suède, le Royaume Uni, L'Amérique du nord (USA, Canada, Mexique), l'Allemagne, le Danemark, le Japon, et la Chine.

¹¹ Les pays Européens ayant des technologies similaires sont assimilés à l'Allemagne, au Danemark, et à la Suède, les pays asiatiques développés sont dotés de technologies Japonaises, et les PVD d'une technologie chinoise

Avec le modèle EEBT les chercheurs étudient le commerce entre seulement deux pays du monde, la récolte de données s'allège et les données deviennent alors plus fiables. Un défaut de ce type d'analyse est la portée géographique très limitée, un commerce bilatéral est loin d'être représentatif de l'ensemble des échanges d'un pays, même dans le cas de la Chine et des USA. Cependant, l'étude bilatérale a l'avantage de mieux représenter le cycle de production nationale, et les différences de structure technologiques et ou productives entre deux pays.

La transparence de ce type d'analyse et sa facilité d'utilisation permet en outre d'apporter des modifications à la méthodologie. Arkerman *et al* (2007) utilisent la formulation TES de Isard, qui est une version élaborée de celle de Leontief (1970). En effet, la version d'Isard prend en compte les préférences des consommateurs, chaque ligne de l'input output est alors doublée et comporte deux biens, les biens issus du pays A, et ceux issus du pays B, qui seront consommés différemment dans chaque pays suivant les préférences du pays A ou du pays B. Su et Ang (2011) vont déflater leurs prix à la production par un ratio prenant en compte la consommation énergétique du pays à différentes années, et l'inflation. Selon les auteurs, les résultats ainsi transformés reflèteront mieux la prise en compte de l'environnement dans le modèle.

Dans notre étude nous avons donc choisi la catégorie du commerce bilatéral afin de mener une analyse précise et poussée, mais aussi afin d'intégrer des modifications dans la méthodologie d'origine afin de mieux représenter la quantité d'émissions incorporées dans le commerce. En effet, nous comptons incorporer dans la demande finale étrangère, l'ensemble des émissions imputables à la consommation d'électricité des secteurs de l'économie. La méthodologie SRIO classique n'incorpore qu'une petite partie des émissions de l'électricité dans la demande finale, le reste des émissions étant attribuées au secteur électrique, comme une énergie de fonctionnement qui nous le verrons prête à confusion.

2.3.2 Analyse de décomposition structurelle (SDA)

La SDA aurait été introduite dans les années 1970 pour étudier, suite aux chocs pétroliers, l'impact des changements dans la production et dans la demande en énergie.

Ang et Zhang (2000)

La SDA est très souvent utilisée dans la littérature existante, elle permet de mener des analyses précises et poussées (Törnqvist *et al* 1985, Park *et al* 1993, Ang 1994, 1995, 1997, 2004, 2005, Ang 2007, Ang et Lee 1994, Ang et Padiyan 1997, Ang *et al* 1998, Sun 1998, Ang et Zhang 2000, Munksgaard et Pedersen 2001, Chung et Rhee 2001, Ang *et al* 2002, Albrecht *et al* 2002, Ang et Liu 2007a, 2007b, He 2010, Edens *et al* 2011, Xu *et al* 2011) Il existe deux catégories de méthodologie pour la SDA : 1) La méthode de Laspeyres, 2) La méthode de Divisia (Ang 2005). La première, mesure le pourcentage de changement d'un groupe de facteur particulier qu'elle isole de la variation totale, la seconde, est une somme pondérée de taux de croissance logarithmique qui va mesurer les variations de tous les facteurs en même temps. Avec une étude portant sur 124 cas de SDA, Ang et Zhang (2000) remarquent que ces deux approches ont surtout été utilisées dans leurs versions basiques avant 1995, passé cette date les chercheurs ont commencé à améliorer la construction méthodologique afin de régler de nombreux problèmes de consistance.

Le problème le plus important est avancé par Ang (1995) : ces deux méthodologies ont le défaut de laisser un résidu inexpliqué après le calcul. En effet, lors des variations, les facteurs interagissent entre eux, mais aussi avec leurs propres variations. Les méthodes présentées ci-dessus ne permettent pas d'extraire ces interactions qui sont alors laissées sous forme d'un résidu. Le problème serait plus important dans la méthode de Laspeyres que dans la Divisia. Bien que minime dans la plus part des cas, Ang et Zhang (2000) remarquent que le résidu obtenu dans l'étude de Park *et al* (1993) atteint 1322% du changement total dans la consommation d'énergie du Japon entre 1980 et 1988.

L'énergie utilisée par un secteur augmente de 10 unités à l'année 0 à 20 unités à l'année T. La différence relative en pourcentage dépend de l'année utilisée comme point de comparaison, i.e. la consommation peut être de 100% plus élevée qu'à l'année 0, ou de 50% plus faible qu'à l'année T, ce qui est asymétrique. [...]L'utilisation du logarithme donne des résultats symétriques puisque $\ln(20/10) = 0,693$ ou $\ln(10/20) = -0,693$

Ang (2004)

Törnqvist *et al* (1985) pointent du doigt un problème d'asymétrie dans la méthode de Laspeyres, cette méthode est en niveaux, alors que celle de Divisia est en changements logarithmiques. Cependant, la méthode Divisia souffre de problèmes lorsqu'un échantillon de données contient des valeurs nulles ou négatives.

Depuis 1995 les deux méthodologies ont été souvent révisées, Sun (1998) propose une réactualisation de la méthode de Laspeyres, pour régler le problème des interactions entre facteurs, il distribue équitablement le terme résiduel entre les facteurs. Du côté de la méthode de Divisia, Ang et Padiyan (1997) introduisent une pondération logarithmique au lieu d'arithmétique pour supprimer le terme résiduel. Cette décomposition désormais appelée LMDI commence à être préférée par Ang. Ang *et al* (1998) avancent l'idée que l'on pourrait régler le problème des valeurs nulles en les substituant par des valeurs positives proches de zéro. Plus tard, Ang et Liu (2007a, 2007b) vont prouver que sous des hypothèses simples, la LMDI est parfaitement robuste avec les valeurs nulles, avec les valeurs négatives, ou avec des valeurs négatives ET positives.

Ang et Zhang (2000) mettent en place quatre tests pour vérifier la désirabilité des méthodes de SDA : 1) Possibilité de renversement des facteurs¹², 2) Renversement du temps¹³, 3) Proportionnalité, 4) Tests d'agrégation. Dans le même sujet, Ang (2004) retient 4 caractéristiques de désirabilité d'une méthode sur une autre : 1) Les fondations théoriques, 2) Capacité d'adaptation, 3) Facilité d'utilisation, 4) Facilité d'interprétation des résultats.

Ainsi, Ang (2004) ne recommande pas l'utilisation de :

- *Les méthodes conventionnelles de Laspeyres*¹⁴ à cause du très large résidu qu'elles laissent.
- Les méthodes *de pondération paramétrique de l'index de Divisia*¹⁵, qui laissent encore un résidu, et sont trop intensives en calcul.
- La *méthode de Paasche* échoue au test de renversement des facteurs et du temps.
- La méthode *de la décomposition parfaite* proposée par Chung et Rhee (2001) est considérée comme trop compliquée.
- La *LMDI*¹⁶ II qui donne des résultats similaires à la *LMDI I* mais en plus compliqués.

Ang (2004) sélectionnera dans son papier 8 méthodologies de SDA qu'il décrit comme ayant des propriétés désirables.

- La méthode de *l'index idéal de Fisher*, et la *méthode conventionnelle de Fisher* sont deux méthodes proposées par Ang *et al* (2002). Elles sont recommandées puisqu'elles donnent une

¹² Les résultats sont les même quel que soit l'ordre des facteurs dans la formulation

¹³ Les résultats sont les mêmes que l'on estime les variations depuis T jusqu'à T+1, ou depuis T+1 jusqu'à T.

¹⁴ Laspeyres index methods

¹⁵ The weighting parametric Divisia index method

¹⁶ Logarithmic mean Divisia index

décomposition parfaite (sans résidu), bien qu'elles soient classées dans la catégorie des méthodes dérivées de l'approche Laspeyres.

- Les *méthodes de Shapley/Sun* (Sun 1998, Albercht *et al* 2002) et *Marshall-Edgeworth* fonctionnent de la même façon, elles distribuent le terme d'interaction (résidu) sur les effets principaux. Cependant Ang (2004) met un bémol à leur utilisation puisque leur formulation nécessite de plus en plus de termes au fur et à mesure que le nombre de facteurs augmente, si bien qu'elle devient trop complexe avec plus de 3 facteurs.
- Enfin Ang (2004) recommande la *LMDI 1* dans sa version *additive* et *multiplicative* pour l'usage général. Elle satisfait le test du renversement de facteurs, de temps, ne donne pas de résidu inexpliqué, et considérant Ang et Liu (2007a, 2007b) elle devient robuste avec l'ensemble des réels \mathbb{R} . De plus, la décomposition prend une forme simple quel que soit le nombre de facteurs impliqués.
- Ang (2004) sélectionne aussi *l'AMD¹⁷* *additive* et *multiplicative*, car les formulations sont plus simples que la LMDI et elles peuvent être utilisées dans de nombreux cas. Cependant, cette méthodologie échoue le test du renversement de facteurs, et laisse un résidu qui peut être grand dans certaines situations décrites dans le papier d'Ang (2004).

La SDA que nous effectuerons dans ce mémoire de maîtrise comprendra 18 facteurs et catégories de facteurs explicatifs, ce qui peut être considéré comme un très grand nombre; de plus nous étudions une période de 8 années. Pour ces raisons, nous ne pouvons pas nous permettre de laisser de résidus inexpliqués qui pourraient prendre des valeurs très grandes. En outre, nous avons besoin d'une grande flexibilité dans l'utilisation des formules pour adapter la méthodologie à la richesse de nos données. L'étude des différentes méthodologies de SDA nous a poussés à choisir la méthode de la LMDI 1 développée dans Ang (2005) pour effectuer notre SDA. Ce choix est motivé par la caractéristique du renversement des facteurs, du temps, et de l'inexistence du résidu non expliqué. Seule la LMDI 1 et 2 proposent ces 3 caractéristiques, en outre la formulation de la LMDI 1 apparaît à la lecture de Ang (2004) comme plus facilement compréhensible et utilisable que sa version 2.

¹⁷ Arithmetic mean Divisia index

2.3.3 Responsabilités

La production créait richesse et consommation, mais c'est aussi le consommateur qui va par sa demande provoquer la production et donc la richesse. L'imputation des responsabilités directement au producteur ne reflète donc pas l'ensemble des sphères d'influence.

Princen (1999)

La comptabilisation des émissions de GES par l'ONU ne prenant en compte que les émissions produites, il se pose alors un problème dans le cadre du protocole de Kyoto. Les pays non-annexe B n'ont aucun objectif de réduction de leurs émissions, contrairement aux pays annexe B qui peuvent profiter alors des émissions des non annexes B en important leurs produits. On appelle ce phénomène les fuites de carbone; elles entraînent un problème de responsabilité dans l'émission de CO₂ des pays annexe B. Partant de ce principe, la majorité des études présentées ont pointé du doigt l'attribution de la responsabilité au producteur du CO₂ comme l'une des failles du protocole de Kyoto (Munskgaard et Pedersen 2001, Ferng 2003, Bastianoni *et al* 2004, Gallego et Lezen 2005, Lenzen *et al* 2007, Hertwich et Peters 2009, Kejun *et al* 2008, Peters 2008, Rodrigues et Domingos 2008, Zaks *et al* 2009, Serrano et Dietzenbacher 2010, Wilting et Vringer 2010, Vetone 2011.). La question est alors de savoir s'il existe des solutions alternatives plus efficaces à la responsabilité producteur ? **i) Doit-on imputer l'entière responsabilité au consommateur ?**
ii) Peut-on partager la responsabilité entre les deux parties ?

i) Responsabilité au consommateur

Les biens manufacturés sont plus souvent produits dans les pays en voie de développement que dans les pays développés. Les pays développés consomment plus de biens manufacturés qu'ils n'en produisent. Les politiques internationales d'atténuation des émissions seraient alors inefficaces. Ces conclusions sont rapportées par Peters (2008) qui réalise une étude complète sur la consommation, la production et le commerce de 73 pays du monde, et par Wilting et Vringer (2010) qui font la même chose avec un monde découpé en 12 secteurs.

Et si le consommateur avait plus de pouvoir sur l'émission de CO₂ que le producteur ? Vetone (2011) avance que le consommateur dispose d'un plus large choix d'actions que les producteurs (logement, transports, en plus des biens de consommation). Pourtant, les pouvoirs politiques n'offrent des possibilités d'action environnementales qu'aux producteurs, ils limitent donc selon

l'auteur les moyens pour le consommateur d'adopter des comportements responsables. Munskgaard et Pedersen (2001) discutent du cas du Danemark et de l'injustice découlant de son objectif au protocole de Kyoto alors que le pays est exportateur net de carbone. Pour Vetones (2011) ou Munstgaard et Pedersen (2001) l'application de la responsabilité de l'émission de CO₂ au consommateur serait un moyen plus efficace pour lutter contre les émissions de GES.

Ces résultats devraient être plus pris en considération, mais ils sont toutefois nuancés par Kejun *et al* (2008), Wilting et Vringer (2010) et Peters (2008) qui avancent qu'il est bien plus facile de réguler la production. La consommation restant libre, il faudrait alors en partie rediscuter les accords commerciaux de l'OMC pour qu'un état puisse arriver à limiter sa consommation de CO₂ par l'instrument politique. Toute une série de mesures pourraient être appliquées pour contribuer à l'amélioration du protocole de Kyoto : la taxation internationale du carbone incorporé aux biens de consommation; le relâchement des contraintes de non-discrimination des biens étrangers; ou la modification des traitements MFN (Most favoured nation) de l'OMC.

ii) Responsabilité partagée

Au-delà du basculement brut de la responsabilité producteur vers la responsabilité consommateur, pourrait-on considérer que les producteurs et les consommateurs soient au même titre responsable de l'émission de CO₂ ?

Bien que le producteur soit entièrement responsable de l'utilisation de la terre et de l'énergie dans le processus de production, il le fait tant que le consommateur décide d'acheter les produits.

Lenzen et al (2007)

Pour Ferng (2003) les responsabilités de l'émission de CO₂ devraient être partagées entre producteur et consommateur. Les modalités du partage de la responsabilité doivent être le fruit de négociations internationales en amont, et le partage des émissions de CO₂ serait donc fait sur la base d'une différenciation entre le bénéfice de la consommation et celui de la production.

Mais, pour Bastianoni *et al* (2004) ce partage des responsabilités ne doit pas se faire qu'entre producteurs et consommateurs. Mais entre tous les acteurs de la chaîne de production, en fonction de leur importance cumulée, dans le processus de transformation des produits industriels.

Lenzen *et al* (2007) développent alors l'idée de comptabiliser toujours par l'amont la production de CO₂, puis à chaque étape de production d'en attribuer une partie au producteur et une partie au consommateur. Afin de donner de la robustesse au partage de la responsabilité, Lenzen *et al* (2007) différencient la part attribuée au consommateur de celle attribuée au producteur, par un indice de la valeur ajoutée sur le prix de vente. Ainsi, la méthode développée dans Lenzen *et al* (2007) permet de responsabiliser chaque acteur de la chaîne de production pour les émissions qu'il produit, ainsi que pour les émissions de tous les acteurs en amont. Ce partage ainsi formulé permet de responsabiliser davantage les producteurs générateurs de valeur ajoutée, et est non dépendent du nombre d'intermédiaires dans la chaîne de production.

Notons cependant que le consommateur final voit sa responsabilité sur les émissions se marginaliser avec l'avance vers l'amont de la production. Lenzen *et al* (2007) justifie cette observation par le fait que plus un acteur s'éloigne d'un point de la chaîne de production, plus il perd d'influence sur ce point dans les processus de négociation interentreprises.

Pour Lenzen *et al* (2007), cette forme de responsabilisation répond parfaitement à l'un des problèmes soulevés par Bastianoni *et al* (2004) qui expliquent qu'une responsabilité totalement imputée au consommateur n'incitera pas les firmes à développer une production plus propre. Et que le consommateur ne traite les problèmes de l'environnement que de façon marginale, le plus souvent sans posséder toute l'information disponible.

Avec leur distribution, les producteurs qui produisent à forte valeur ajoutée (Soit d'importants salaires, investissements, profits, etc) seront relativement plus pénalisés que des organismes intermédiaires à très faible valeur ajoutée. Cette pénalisation plus forte devrait entraîner une incitation à la réduction des émissions d'autant plus forte. En bout de chaîne, le consommateur se voit attribuer une responsabilité dans l'émission de CO₂ en fonction de l'utilité tirée de sa consommation, comparée aux émissions nécessaires à l'ensemble de la production. Par cette méthode, Lenzen *et al* (2007) internalisent ainsi avec brio l'externalité qu'est l'émission de CO₂. Dans le cadre des discussions de ce mémoire de maîtrise, nous discuterons de la méthodologie de Lenzen *et al* (2007) afin d'analyser comment se comporte leur modèle dans le cadre de l'analyse des fuites de CO₂ du commerce bilatéral France-Chine.

3 Balance des émissions incorporées au commerce France-Chine

Nos résultats indiquent que les échanges internationaux sont un facteur significatif expliquant le changement dans les émissions de nombreux pays, de la perspective du producteur autant que de celle du consommateur. En addition aux émissions territoriales, nous suggérons que les pays devraient réguler les transferts d'émission via le commerce international pour contenir la progression des émissions globales de gaz à effet de serre.

Peter et al (2011)

3.1 Récupération des données.

Pour ce mémoire de Maitrise, nous avons recherché et extrait les données de la consommation française et chinoise d'inputs énergétiques à usage final. Nous avons utilisé conjointement les bases de : l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) qui totalise 54 secteurs d'activité français et chinois de 1996 à 2009; du Service des Études Statistiques Industrielles (SESSI) qui compte 114 secteurs français de 1996 à 2007; et du Bureau National des Statistiques de Chine qui rassemble 35 secteurs chinois pour 1991 à 2008. La consommation énergétique finale de chaque secteur comprend jusqu'à 18 combustibles différents pour l'usage final, 3 sources de production d'électricité non émettrice de CO₂, et 10 combustibles utilisés pour l'électricité autoproduite ou produite par des centrales thermiques. Les combustibles sont comptabilisés en volume et ont tous été attachés d'un pouvoir calorifique, d'une teneur en carbone, et d'un taux d'oxydation (GIEC 2006). Nous avons ensuite extrait de l'OCDE, les données de TES domestiques¹⁸ et les matrices de commerce bilatéral¹⁹ entre les deux pays, elles comprennent 90 secteurs d'activité et vont de 1990 à 2005. Nous totalisons ainsi l'extraction et le traitement de plus de 643 000 points de données.

Les classifications sectorielles²⁰ diffèrent d'une base de données à l'autre et d'un pays à l'autre (NES114, CITI rev 3, CITI rev 3.1, CITI rev 4, STAN). Nous avons dû utiliser 5 tables de correspondance différentes pour arriver à classer l'ensemble des données dans un modèle unique et compatible avec le maximum de secteurs. Aussi, il s'avère que les données n'ont pu être classifiées que pour une période allant de 1996 à 2003, au-delà les données ne sont plus compatibles à cause de changements dans les méthodes de comptabilisation des inputs chinois. Nous travaillerons sur une classification comprenant 19 secteurs aux productions exportables, 3 secteurs non exportables (énergie, services non manufacturés, ménages), 31 sources d'énergie décomposées en 4 facteurs physiques (pouvoir calorifique et teneur en carbone), 8 années d'étude, et deux pays. Notre modèle totalise ainsi 51 744 entrées. (Pour l'information complète sur les données, voir l'annexe 3.1)

¹⁸ TES dont est soustrait la valeur des importations étrangères ré-utilisées dans la production.

¹⁹ Notre modèle ne considère que les exportations bilatérales, ainsi les droits de douanes, frais de ports, pertes, et autres biais à la valeur réelle de l'exportation ne sont pas pris en compte.

²⁰ Réfère à la façon de trier et classer les secteurs de l'économie

3.2 Méthodologie

Pour calculer la balance des émissions incorporées au commerce, nous devons d'abord construire deux indicateurs, *l'intensité directe* d'émission de CO₂ (Section 3.2.1) et *l'intensité totale* d'émission de CO₂ (Section 3.2.2).

3.2.1 Intensité directe d'émission de CO₂.

L'intensité directe d'émission de CO₂ exprime l'émission de CO₂ nécessaire à une industrie pour produire 1 dollar d'output industriel. Elle s'exprime de la façon suivante :

$$\omega = \frac{CO2}{y} \quad (1)$$

ω est *l'intensité directe d'émission nationale*; $CO2$ représente *l'émission de CO₂ national*; y est *l'output industriel domestique*²¹ national.

Suivant Shui et Harriss (2006) et Du *et al* (2011) nous pouvons construire l'intensité directe sectorielle sur plusieurs années en déflattant les prix à la production :

$$\omega_i = \frac{CO2_i}{D_p y_i} \quad (2)$$

ω_i est *l'intensité directe d'émission de CO₂ du secteur i* ; $CO2_i$ représente *les émissions de CO₂ du secteur i* ; y_i *l'output domestique du secteur i* . D_p est *le déflateur des prix à la production avec pour base 100% à l'année 1996*.

Suivant la méthodologie officielle d'inventaire des gaz à effet de serre du GIEC (2006), les émissions de CO₂ du secteur i sont calculées à partir des données précises des consommations énergétiques de chaque secteur i comme suit :

$$CO2_i = \sum_{c=1}^n \frac{44}{12} o_c t_c f_c x_c^i \quad (3)$$

²¹ Ici nous utilisons l'output domestique pour ne pas prendre en compte les consommations intermédiaires importées dans le calcul. Ainsi seule la production nationale est prise en compte.

o_c : le taux d'oxydation du combustible c ;

t_c : la teneur en carbone du combustible c ;

f_c : le pouvoir calorifique du combustible c ;

x_c^i : le volume de combustible c utilisé dans la production du secteur i , comptabilisé en unités métriques;

n : l'ensemble des combustibles utilisés dans l'étude.

44/12 : la masse du CO₂, par rapport à celle du carbone seul.

Notons que l'énergie nucléaire, éolienne, photovoltaïque, hydraulique et géothermale ne produisent pas d'émission de CO₂ (teneur en carbone nulle).

3.2.2 Intensité totale d'émission de CO₂.

L'intensité totale est l'émission de CO₂ nécessaire pour produire 1 dollar de demande finale. Cette émission est dite *incorporée*, car l'entreprise achète ou vend des CI et donc *virtuellement* elle achète ou vend de l'émission de CO₂ aux autres secteurs de l'économie. La somme de ces échanges virtuels de CO₂ représente la quantité de CO₂ réellement nécessaire pour concevoir un produit fini. L'intensité totale nationale s'exprime donc de la façon suivante :

$$e = \frac{CO_2}{\beta} \quad (4)$$

e est l'intensité totale de l'émission de CO₂ nationale; CO_2 est l'émission de CO₂ nationale; β est la demande finale du pays.

Suivant la méthodologie de Leontief et Ford (1970), nous pouvons calculer l'output de l'économie grâce aux TES (He et Fu 2012) :

$$Y = (Id - A^d)^{-1}B \quad (5)$$

Y est un vecteur $N \times 1$ dont les éléments y_i , $i=1, 2, \dots, N$ sont les outputs des secteurs i ; La matrice $(Id - A^d)^{-1}$ est la matrice des coefficients inverses de Leontief, dont les éléments b_{ij} représentent l'output généré par chaque secteur économique pour concevoir une unité de demande finale du secteur j ; B est un vecteur $N \times 1$ dont les éléments β_i représentent la demande finale des secteurs i ,

incluant consommation des ménages, du gouvernement, investissement, variation des stocks et exportations vers le reste du monde.

En distribuant l'intensité directe des secteurs i sur les éléments des i lignes de la matrice des coefficients inverses de Leontief, puis, en sommant l'ensemble des éléments d'une colonne j , qui sont donc devenus les achats de CO₂ du secteur j , nous trouvons l'intensité totale du secteur j (He et Fu 2012) :

$$E = \Omega(Id - A^d)^{-1} \quad (6)$$

E est un vecteur $N \times 1$ dont les éléments e_i sont les taux d'intensité totale d'émission de CO₂ des secteurs i ; Ω est une matrice diagonale $N \times N$ dont les éléments ω_{ij} ($i=j$) sont les taux d'intensité directe d'émission de CO₂ des secteurs i , les éléments hors diagonale de la matrice sont quant à eux égaux à 0;

Enfin, nous pouvons incorporer le CO₂ dans les exportations en multipliant l'intensité totale par les exportations (He et Fu 2012).

$$S = \Omega(Id - A^d)^{-1}X \quad (7)$$

S est un vecteur $N \times 1$ dont les éléments s_i représentent le volume d'émission de CO₂ incorporé dans les exportations du secteur i ; X est un vecteur $N \times 1$ dont les éléments x_i sont les exportations des secteurs i .

Notons que l'utilisation des matrices IO nécessite plusieurs hypothèses, 1) nous devons supposer que chaque secteur produit un bien ou un service homogène, 2) nous devons considérer qu'il n'existe pas d'externalités intersectorielles.

3.3 Résultats des calculs

La France, pays annexe B du protocole de Kyoto, est-elle un bon élève au regard de son objectif ? Dans cette section résultats, nous présenterons l'aperçu global des émissions incorporées dans le commerce France-Chine. Nous débutons la section par les intensités d'émission totales de CO₂

(Section 3.3.1). Puis, nous calculons la BEET (Section 3.3.2). Enfin, nous effectuons une première analyse de la relation entre commerce et environnement (Section 3.3.3).

3.3.1 L'intensité d'émission totale de CO₂

Pour débiter cette section, nous présentons l'intensité nationale française et chinoise sur toutes les années d'étude dans le tableau 3.1.

Table 3.1 Évolution temporelle de l'intensité nationale

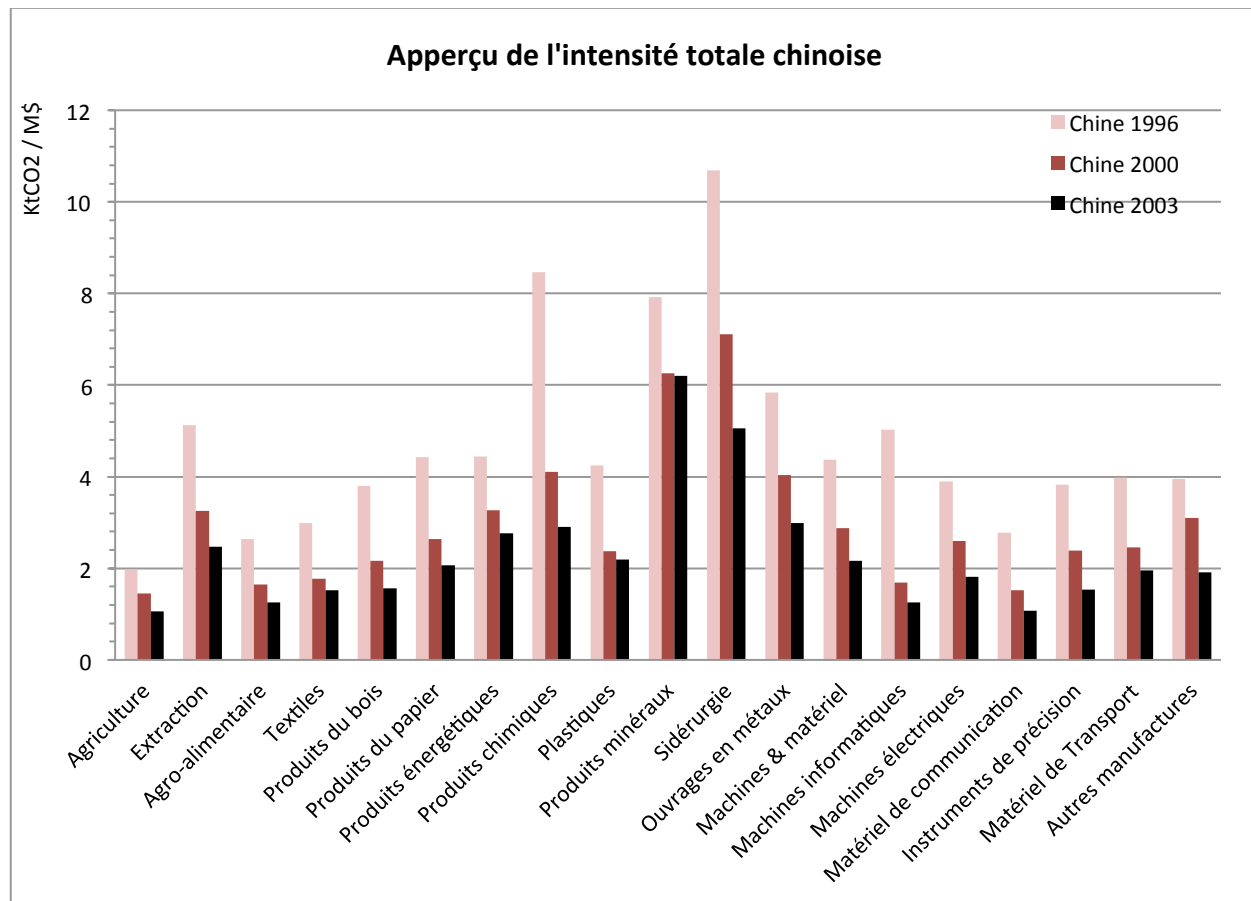
	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Intensité France (tCO₂ / M\$)	265	271	287	296	288	260	230	209
Intensité Chine (tCO₂ / M\$)	3 530	3 138	2 933	2 571	2 372	1 967	1 790	1 795
E^c/E^f	13,3	11,6	10,2	8,7	8,2	7,6	7,8	8,6

Notons la baisse de l'intensité chinoise qui chute de 49% en 8 ans. L'intensité française baisse de 22% sur la même période, mais on remarque qu'entre les années 1996 à 1999 elle augmente de 12% jusqu'à un maximum de 296 tCO₂/M\$ en 1999, puis diminue sur la période suivante réalisant alors une baisse de 30% en 4 ans seulement.

Enfin, en 1996, la production chinoise est 13,3 fois plus polluante que celle de la France, elle tombe à 7,6 en 2001 et remonte à 8,6 en 2003. Nous nous donnons pour objectif d'étudier plus en détail ces variations d'intensité dans le chapitre suivant, en particulier l'augmentation d'intensité française entre 1996 et 1999, et la baisse constante de l'intensité chinoise.

Nous allons maintenant présenter l'intensité totale des 19 secteurs exportables de l'étude. La figure 3.1 présente l'intensité chinoise de 1996 (en rouge clair), 2000 (en rouge vif), et 2003 (en noir).

Figure 3.1 Intensité totale des secteurs chinois

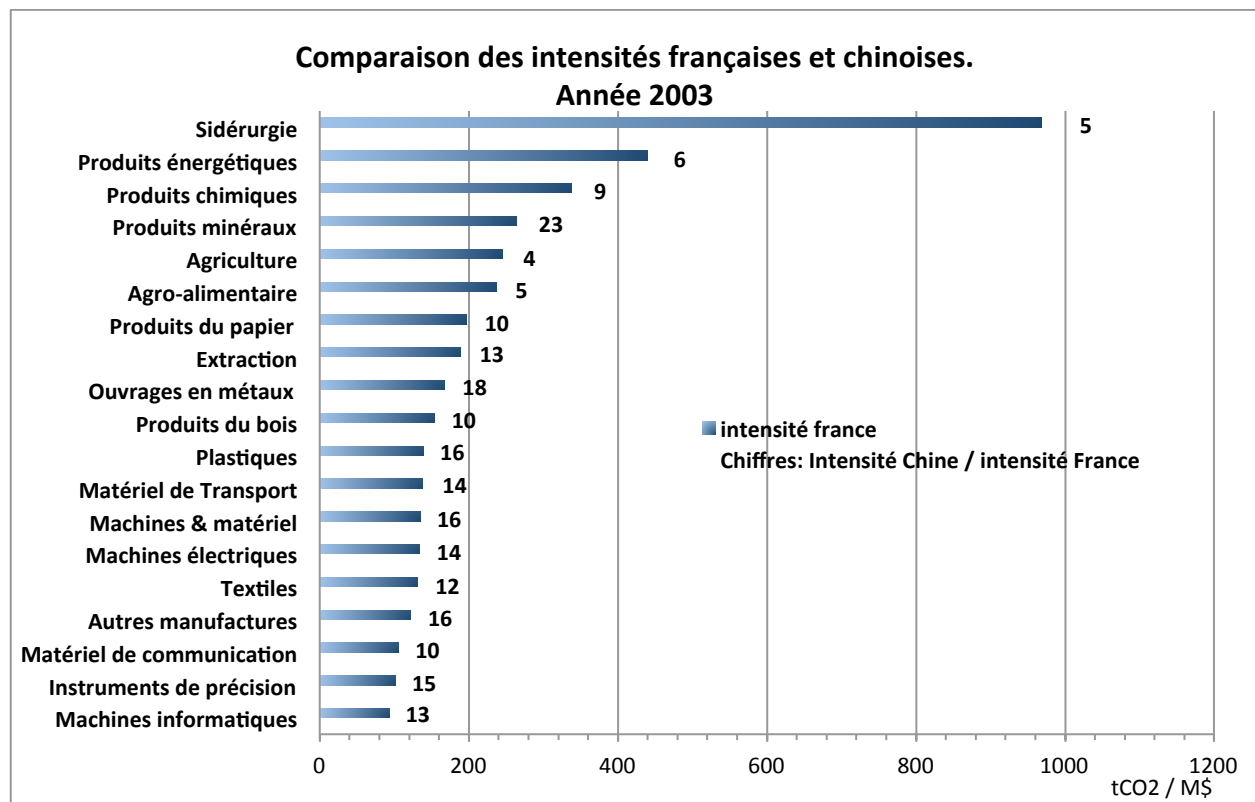


Avec 6 197 tonnes de CO₂ pour un million de dollars de production (tCO₂/M\$), le secteur des produits minéraux non métalliques est le secteur chinois le plus polluant pour l'année 2003. Il est suivi du secteur de la sidérurgie, des ouvrages en métaux, des produits chimiques, des produits énergétiques et de l'extraction. En 2003 en Chine, les secteurs les moins intensifs en CO₂ sont le secteur agricole, celui du matériel de communication, l'agroalimentaire, et le matériel informatique.

Notons la baisse de 75% de l'intensité totale d'émission de CO₂ du secteur des machines informatiques sur les 8 années d'observation. Durant la même période, le secteur de la chimie voit son intensité chuter de 66% et celle du secteur de la sidérurgie de plus de 50%; ce sont les deux plus importantes baisses en volume. (L'ensemble des données pour toutes les années d'études est listé dans l'annexe 3.2)

Sur la figure 3.2, nous présentons l'intensité française. Afin de présenter la différence d'efficacité entre la France et la Chine, nous divisons l'intensité totale d'émission des secteurs chinois par celle des secteurs français (chiffres noirs).

Figure 3.2 Intensité totale des secteurs français en 2003



Le secteur français le plus polluant est la sidérurgie avec une émission de 968 tCO₂/M\$ pour l'année 2003. Il est suivi du secteur des produits énergétique et des produits chimiques. Concernant les secteurs les moins polluants, ce sont les machines informatiques, instruments de précision, matériel de communication, les autres manufactures et les textiles.

Notons que la production française est relativement plus propre que celle de la Chine. Le secteur des produits minéraux est 23 fois moins polluant en France qu'en Chine, les ouvrages en métaux sont 18 fois moins polluants, et les autres manufactures 16 fois moins. Remarquons que les secteurs dont l'intensité d'émission de CO₂ est la plus similaire font aussi partie des plus

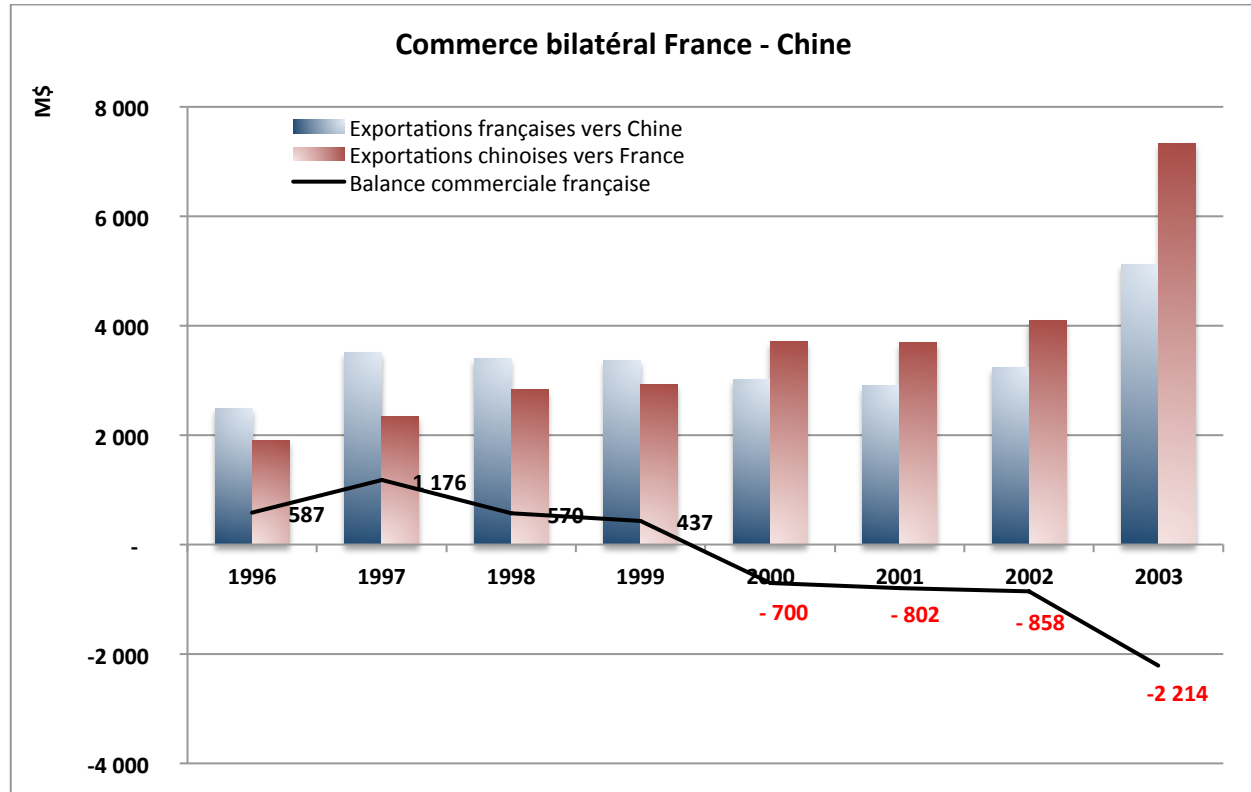
polluants, c'est le cas de la sidérurgie, dont la production est 5 fois moins polluante en France qu'en Chine. Mais aussi les produits énergétiques, 6 fois moins polluants, ou les produits chimiques 9 fois moins polluants. (L'ensemble des données pour toutes les années d'études est listé dans l'annexe 3.2). Par contre, les différences de l'intensité d'émission de CO₂ les plus grandes se trouvent plus fréquemment dans les secteurs relativement moins polluants (c-à-d., plastique, équipement électrique, informatique, etc.)

3.3.2 La balance des émissions de CO₂

Le commerce entre la France et la Chine s'est-il adapté aux différences d'intensité de CO₂ vues dans la partie précédente ? Quels secteurs sont les principaux contributeurs à la BEET?

La figure 3.3 présente les exportations françaises vers la Chine (en bleu), les exportations chinoises vers la France (en rouge), ainsi que la balance commerciale française (ligne noire).

Figure 3.3 Commerce bilatéral France Chine



La figure 3.3 met en évidence le passage d'une situation d'excédent à une situation de déficit commercial pour la France. En 1999, la France exporte vers la Chine 437 M\$ de produits de plus que la Chine n'en exporte vers la France, passé l'an 2000 la balance se retrouve en déficit de 700 M\$, et plus de 2,2 G\$ en 2003 (la balance commerciale sectorielle est détaillée dans l'annexe 3.3).

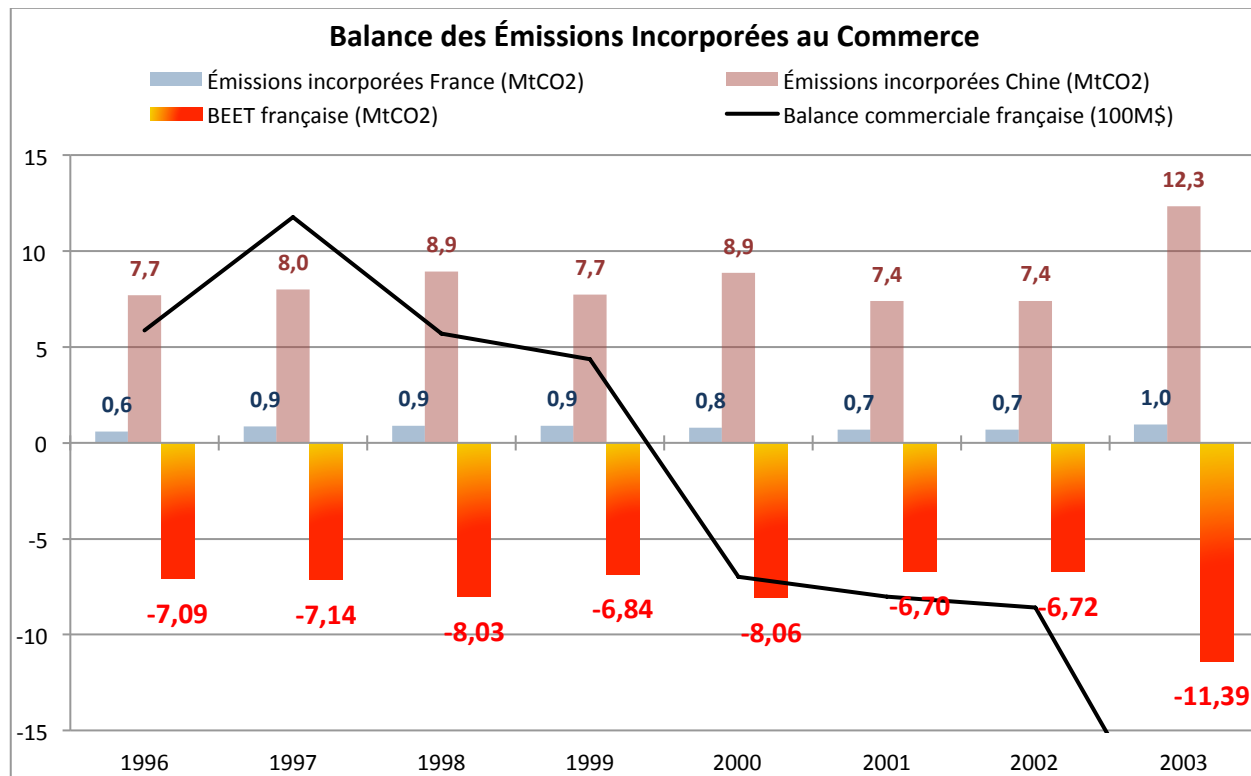
Reprenons l'équation (7) de la section 3.2.2, pour former une balance des émissions incorporée au commerce bilatéral entre la France et la Chine.

$$BEET^f = S^f - S^c = \Omega^f (Id - A^{df})^{-1} X^f - \Omega^c (Id - A^{dc})^{-1} X^c \quad (8)$$

*BEET^f est la balance des émissions incorporées au commerce français avec la Chine; S^f (respectivement, S^c) est le volume d'émission de CO₂ incorporé dans les exportations françaises vers la Chine (respectivement, les exportations chinoises vers la France); X^f (respectivement, X^c) sont les exportations françaises vers la chine (respectivement, les exportations chinoises vers la France); Ω^f (respectivement, Ω^c) est une matrice diagonale N*N dont les éléments ω_{ij} (i=j) sont les taux d'intensité directe d'émission de CO₂ des secteurs français i (respectivement, des secteurs chinois i), les éléments hors diagonale de la matrice sont quant à eux égal à 0; La matrice (Id-A^{df})⁻¹ (respectivement, (Id-A^{dc})⁻¹) est la matrice des coefficients inverses de Leontief française (respectivement, chinoise)*

La figure 3.4 présente la BEET française (en rouge) qu'elle met en relation avec la balance commerciale française (ligne noire). Respectivement, la BEET est en MtCO₂, la balance commerciale en 100 millions de \$.

Figure 3.4 Balance des émissions incorporées au commerce (BEET)



En 1996, alors que la balance commerciale française est excédentaire, la BEET est déjà négative avec un déficit de 7,09 MtCO₂. Les années suivantes nous pouvons remarquer que la baisse de l'intensité chinoise (tableau 3.1) et l'augmentation du déficit français (figure 3.3) se compensent, laissant la BEET dans une situation de déficit relativement constant. Notons enfin, la forte augmentation du déficit pour l'année 2003, situation à mettre en corrélation avec la chute vertigineuse de la balance commerciale française. En étudiant plus précisément les données des balances commerciales et BEET sectorielles (annexe 3.2) nous découvrons que le secteur des machines informatiques est responsable de 41% de la variation d'amplitude²² de la BEET.

Enfin, en 2003 le déficit de 11,39 MtCO₂ est égal à 2,9% des émissions de CO₂ françaises. Étant donné que la France est contrainte par le protocole de Kyoto, ce déficit sera considéré comme une fuite de CO₂ française vers la Chine.

²² L'amplitude des variations est égale à la somme des variations absolues de tous les secteurs, soit de 5,4 MtCO₂ entre 1996 et 2003.

3.3.3 Le commerce international et les émissions de CO₂

Dans cette dernière partie du chapitre trois, nous souhaitons étudier s'il existe une relation entre intensité d'émission de CO₂ sectorielle et la composition du commerce bilatéral. Aussi, il serait intéressant de déterminer un cas de figure où le commerce joue un rôle positif dans la lutte contre les GES.

Dans cette optique il serait intéressant de représenter la relation dans un nuage de point. Sur l'axe horizontal, nous construisons un indicateur de la *dominance commerciale* du secteur i .

$$P_i = \frac{X_i^c - X_i^f}{X_i^f + X_i^c} \quad (9)$$

Où P_i est l'indicateur de dominance commerciale du secteur i ; X_i^f (respectivement X_i^c) sont les exportations françaises vers la Chine (respectivement, chinoises vers la France) du secteur i .

Intuitivement, plus la valeur de l'indicateur de dominance commerciale est négative et tend vers -1 (respectivement, positive et tend vers +1), plus la France (respectivement, la Chine) domine le marché des exportations du secteur. Aussi, une valeur de dominance commerciale qui tend vers zéro correspond à un volume d'exportation sectorielle similaire entre la France et la Chine

Sur l'axe vertical, nous construisons le rapport de l'efficacité relative entre l'intensité totale française et l'intensité totale chinoise du secteur i .

$$A_i = E_i^c / E_i^f \quad (10)$$

A_i est la mesure de l'efficacité relative, entre la France et la Chine, de l'intensité totale du secteur i , E_i^f (respectivement, E_i^c) est l'intensité totale française (respectivement, chinoise) du secteur i .

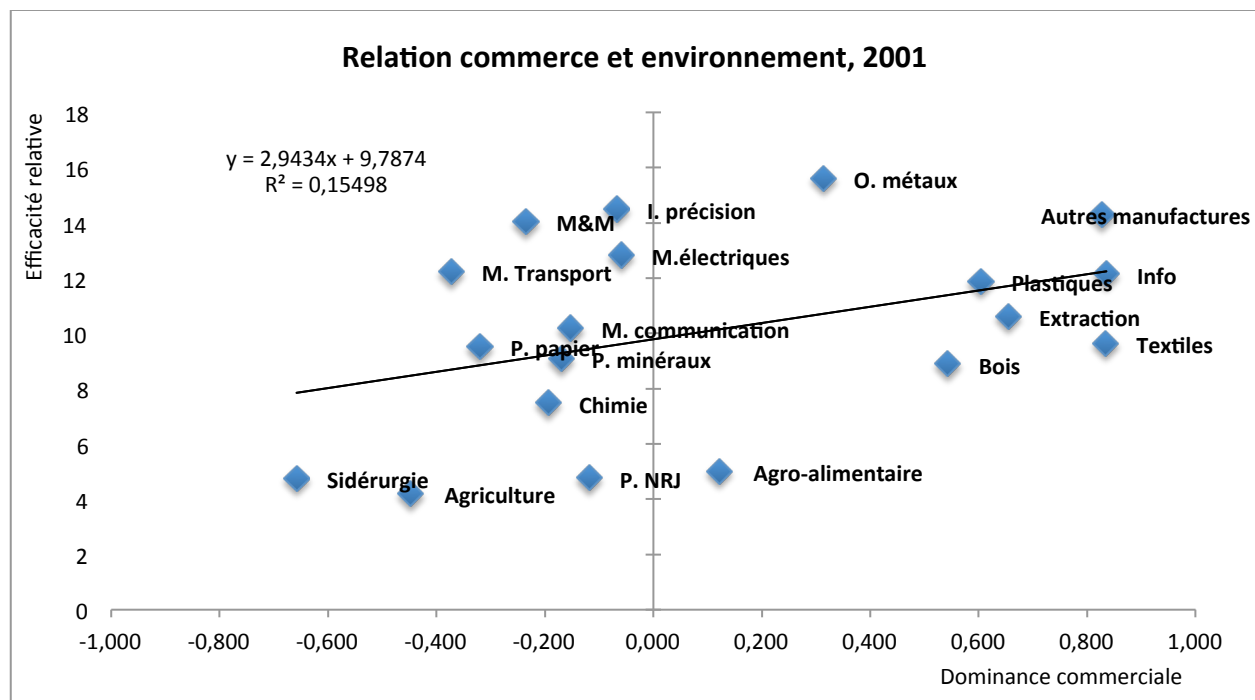
Intuitivement, plus la mesure de l'efficacité relative est élevée (respectivement, faible), plus la production française (respectivement, chinoise) est propre, en comparaison à la production de son partenaire. Aussi, une valeur d'efficacité comprise entre 0 et 1 représente une production chinoise plus propre que la production française.

En toute logique, si le commerce joue un rôle positif dans la lutte contre les GES, quel que soit le pays nous devrions observer une dominance commerciale dans les secteurs où l'émission de CO₂ est relativement plus faible que chez le partenaire. Soit, sur un graphique :

- Des valeurs extrêmes à l'abscisse qui tend vers -1 (dominance française) et dont l'ordonnée est très élevée (efficacité relativement meilleure en France).
- Des valeurs extrêmes à l'abscisse qui tend vers +1 (dominance chinoise) et dont l'ordonnée est très faible (efficacité relativement meilleure en Chine).
- Des valeurs intermédiaires à la disposition linéaire comprise entre les deux extrêmes décrits précédemment. Au final, nous devrions pouvoir tracer une droite de régression au coefficient négatif, qui pourrait être utilisé en temps qu'indicateur de *la prise en compte de l'environnement dans les choix commerciaux*.

Par exemple, la figure 3.5 présente la dominance commerciale française ou chinoise et l'efficacité relative de France vs. Chine des 19 secteurs, pour l'année 2001²³. Clairement, la relation tracée est inverse de notre logique illustrée plus haut.

Figure 3.5 Relations commerce et environnement 2001.



²³ L'année 2001 à la plus forte significativité de relation, nous l'avons donc choisi comme exemple

Les données de la figure 3.5 montrent que :

- La moyenne des abscisses est de 0,102 pour 2001, ceci signifie que le commerce sectoriel est à dominance chinoise (faible) : l'exportation chinoise est en moyenne plus prononcée.
- La moyenne²⁴ de l'axe des ordonnées montre que la production des secteurs est 10,1 fois plus polluante en Chine qu'en France.
- La droite de régression de l'année 2001 possède un R^2 de 15,5% (faible).
- La P-value du coefficient de la droite de régression de 2002 est à 0,095 (significatif à 10%)

L'analyse du graphique révèle qu'en 2001 :

- La constante égale à 9,78 indique que la production des biens est en moyenne 9,78 fois plus polluante en Chine.
- Le coefficient de la courbe égale à 2,94, indique que lorsque la Chine domine à 100% le marché des exportations, la production des biens exportés est 12,73 fois plus polluante en Chine qu'en France. À l'inverse quand la France domine à 100% le marché des exportations, la production des biens exportés est 6,85 fois plus polluante en Chine qu'en France.

Ainsi, même en considérant que la production chinoise est toujours plus polluante que la production française, la Chine exporte plus dans les secteurs dont l'efficacité relative est la moins élevée. Clairement, l'effort de la réduction des CO₂ ne semble pas avoir sa place dans l'organisation du commerce Franco-Chinois.

Ce constat est directement à l'opposé de la logique qui voulait que chaque pays exporte la production sectorielle dans laquelle son émission de CO₂ relative est la plus faible. Aussi, nous remarquons sur le tableau 3.2 que cette tendance s'amplifie d'une année sur l'autre.

Table 3.2 régressions annuelles de la relation entre commerce et environnement.

Année	Régression du nuage de points	R^2	P-value du coefficient	Moyenne ordonnée	Moyenne abscisse
1996	$y = 1,3505x + 20,93$	0,4%	0,795	21,1	0,108
1997	$y = 1,8007x + 17,03$	2,1%	0,555	17,2	0,111

²⁴ N'est pas une moyenne en volume comme les résultats du tableau 3.1.

1998	$y = 1,7168x + 15,08$	2,0%	0,560	15,3	0,121
1999	$y = 1,2263x + 11,83$	2,5%	0,515	11,9	0,055
2000	$y = 2,3005x + 11,135$	7,3%	0,261	11,4	0,095
2001	$y = 2,9434x + 9,79$	15,5%	0,095*	10,1	0,102
2002	$y = 2,8939x + 10,73$	12,4%	0,138	11,0	0,086
2003	$y = 1,7336x + 11,89$	3,8%	0,421	12,1	0,130

Dans notre cas d'étude, la Chine exporte en France les biens des secteurs dans lesquels la différence d'intensité d'émission est la plus élevée. En 2001, les choix commerciaux entre la France et la Chine sont les moins optimaux de la période 1996 à 2003, en 1999 ils seraient les plus efficaces de la période. L'étude des droites de régression de chaque année montre qu'à partir de 1996 cette tendance s'amplifie d'une année sur l'autre, sauf à partir de 2002 où elle commence à diminuer.

Remarquons cependant que la très faible significativité des coefficients, et les faibles R^2 , imposent un bémol à ces observations. Nous devons ajouter que la relation entre dominance commerciale et efficacité relative est très faible ou marginale. Le marché reste donc régulé par d'autres facteurs que celui de l'environnement durant les 8 années d'étude.

Enfin, nous pouvons relever plusieurs critiques à l'analyse de la relation entre commerce et environnement.

- La période d'analyse est plutôt courte, afin d'observer une restructuration des exportations sectorielles, le temps d'observation devrait être idéalement plus long pour capter l'effet d'inertie associé à la mise en place de législations commerciales.
- Conséquence directe d'une période courte, il existe des variations cycliques dans l'exportation de certains produits d'importance géopolitique, c'est par exemple le cas des combustibles nucléaires ou du pétrole raffiné. En retirant ce type de données de notre analyse, nous constatons une amélioration de tous les indicateurs de significativité (R^2 et P-Value), mais toutefois pas suffisante pour affirmer l'existence d'un lien.

3.4 Conclusion

Grâce à des données très riches, nous avons construit des intensités totales d'émission de CO₂ pour 19 secteurs français et chinois, puis la balance des émissions incorporées au commerce. Et enfin, nous avons réalisé une première étude de la relation entre commerce et environnement.

Retenons que l'intensité nationale chinoise est selon les années de 8 à 13 fois plus importante que l'intensité française. En 2003, certains secteurs sont jusqu'à 23 fois plus polluants en Chine qu'en France. Pourtant, l'intensité chinoise a subi une baisse constante, pour arriver à la moitié de sa valeur de 1996 en 2003. L'intensité française a au contraire augmenté durant la période 1996 à 1999, puis a diminué après 1999. Cette différence d'intensité, mêlée à une balance commerciale française en réduction constante, provoque un déficit de la BEET française. Ce déficit, aussi considéré comme une fuite de CO₂, va de 7,1 MtCO₂ en 1996 à 11,4 MtCO₂ pour l'année 2003. En 2003, il représente déjà 3,4% des émissions nationales de la France.

Nous mettons ici l'accent sur un fait important de la lutte contre les GES dans le commerce international, nous avons découvert que la composition du commerce bilatéral entre la France et la Chine a tendance à avoir un impact négatif sur l'émission de GES. En effet, la Chine exporte en France des produits comparativement plus polluants, que ceux que la France exporte en Chine. Ce type d'observation concorde avec une absence de la prise en compte des émissions de CO₂ dans le commerce international, ou avec le fait qu'aucune régulation existante ne pousse à modifier la composition du commerce pour limiter l'émission de GES.

Enfin, ce chapitre nous aura apporté une vision d'ensemble des émissions incorporées dans le commerce entre la France et la Chine. Nous pouvons en appui de notre analyse tirer plusieurs conclusions. 1) Il existe de la part de chaque pays un effort considérable en matière de réduction de l'intensité d'émission de CO₂. 2) La France pays annexe B de Kyoto, bénéficie d'importantes fuites de CO₂, et ces fuites auraient tendance à augmenter dans le temps. 3) L'analyse d'une relation entre commerce et environnement montre l'inexistence d'un lien entre ces deux composantes. Cela peut être la conséquence d'une analyse qui souffre d'une période de temps trop courte, ou bien à un commerce cyclique., ou enfin réellement à l'absence de législation contraignante. 4) Nous observons donc un impact négatif de la composition du commerce sur

l'émission de GES, cet impact pourrait-il être évité avec une législation plus contraignante ?

Aussi serait-il intéressant de pouvoir continuer l'analyse au-delà de 2003, et jusqu'à 2012, dernière année de Kyoto, et période où l'état français²⁵ et certaines entreprises privées²⁶ commencent à prendre des décisions commerciales en rapport avec les émissions de CO₂.

²⁵ Liste non exhaustive: Bonus/malus automobile, étiquetage révisé de la consommation énergétique des produits électriques, habitations, voitures, pneus.

²⁶ Liste non exhaustive: Étiquetage de la consommation de CO₂ des produits de consommation courante par Leclerc ou Casino

4 Analyse de décomposition structurelle (SDA)

En conclusion nous recommandons les formes multiplicatives et additives de la LMDI I, pour ses fondations théoriques, son adaptabilité, sa facilité d'utilisation, et la facilité d'interprétation de ses résultats.

Ang (2004)

4.1 L'approche méthodologique

Si nous considérons que les gaz à effets de serre sont la conséquence d'une série de facteurs comme la technologie, la demande, le type de combustible utilisé, l'efficacité de la production, comment déterminer l'importance de chacun d'entre eux dans les changements d'émissions perçus d'une année sur l'autre ?

4.1.1 Le modèle LMDI

La SDA permet d'analyser l'évolution de facteurs d'émission de CO₂ et d'en déduire les changements absolus dans le flux total de CO₂ émis d'une année sur l'autre. La méthodologie de SDA que nous utilisons est tirée de la LMDI développée dans Ang (2005).

Rappelons les émissions incorporées au commerce :

$$S = \Omega(Id - A^d)^{-1}X \quad (1)$$

$$S_i = E_i X_i \quad (2)$$

E_i est l'intensité totale d'émission de CO₂ du secteur i ; X_i les exportations du secteur i ; S_i est l'émission de CO₂ incorporée aux exportations du secteur i .

D'une période t à la période $t+1$, nous voulons isoler la variation de chaque facteur, et ainsi en déduire leurs effets sur les variations des émissions totales de CO₂ :

$$\Delta S_i = S_{i,t+1} - S_{i,t} \quad (3)$$

$$\Delta S_i = (S_{i,t+1} - S_{i,t}) \times \frac{\ln S_{i,t+1} - \ln S_{i,t}}{\ln S_{i,t+1} - \ln S_{i,t}} \quad (4)$$

$$\Delta S_i = \frac{S_{i,t+1} - S_{i,t}}{\ln S_{i,t+1} - \ln S_{i,t}} \times \ln \left(\frac{S_{i,t+1}}{S_{i,t}} \right) \quad (5)$$

En substituant l'équation (2) dans l'équation (5) nous obtenons:

$$\Delta S_i = \frac{S_{i,t+1} - S_{i,t}}{\ln S_{i,t+1} - \ln S_{i,t}} \times \ln \left(\frac{E_{i,t+1} X_{i,t+1}}{E_{i,t} X_{i,t}} \right) \quad (6)$$

$$\Delta S_i = \frac{S_{i,t+1} - S_{i,t}}{\ln S_{i,t+1} - \ln S_{i,t}} \times \left[\ln \left(\frac{E_{i,t+1}}{E_{i,t}} \right) + \ln \left(\frac{X_{i,t+1}}{X_{i,t}} \right) \right] \quad (7)$$

$$\Delta S_i = \frac{S_{i,t+1} - S_{i,t}}{\ln S_{i,t+1} - \ln S_{i,t}} \ln \left(\frac{E_{i,t+1}}{E_{i,t}} \right) + \frac{S_{i,t+1} - S_{i,t}}{\ln S_{i,t+1} - \ln S_{i,t}} \ln \left(\frac{X_{i,t+1}}{X_{i,t}} \right) \quad (8)$$

Ainsi de t à $t+1$, le membre du milieu de l'équation (8) représente l'effet de la **variation de l'intensité totale** de CO₂, sur la variation du volume de l'émission incorporée aux exportations du secteur i . Le membre de droite est l'effet de la **variation de l'exportation**, sur la variation du volume de l'émission incorporée aux exportations du secteur i .

Par construction, S_i est la somme des émissions incorporées dans les consommations intermédiaires (CI) achetées par le secteur i , plus (+) l'émission incorporée à son autoconsommation. En considérant que S_{ji} représente l'émission incorporée par le secteur j dans la CI b_{ji} , nous pouvons donc écrire :

$$S_i = \sum_{j=1}^n S_{ji} = \sum_{j=1}^n \omega_j b_{ji} X_i \quad (9)$$

ω_j est l'intensité directe d'émission de CO₂ du secteur $j=1, 2, \dots, n$; b_{ji} est l'élément de la matrice inverse des coefficients de Leontief ligne j , colonne i ; S_{ji} est l'émission de CO₂ incorporée par le secteur j , dans la CI b_{ji} (Si $j=i$, S_{ji} représente l'émission incorporée dans l'autoconsommation du secteur i);

En considérant $\omega_i = \frac{CO2_i}{D_p y_i}$

$$S_{ji} = \frac{CO2_j}{D_p y_j} b_{ji} \frac{X_i}{X} X \quad (10)$$

$CO2_i$ est l'émission de $CO2$ du secteur i ; $D_p y_i$ est l'output à prix courants du secteur i ; X représente les exportations totales du pays.

En considérant $CO2 = \sum_{c=1}^m \frac{44}{12} o_c t_c f_c x_c^i$

$$S_{ji} = \frac{\sum_{c=1}^m \frac{44}{12} o_c t_c f_c x_c^i}{D_p y_i} b_{ji} \frac{X_i}{X} X \quad (11)$$

o_c est le taux d'oxydation du combustible c qui appartient à l'ensemble des combustibles m ; t_c est la teneur en carbone du combustible c ; f_c est le pouvoir calorifique du combustible c ; x_c^i est le volume de combustible c utilisé par le secteur i .

l'Équation (11) peut être par la suite écrite comme (12)

$$S_{ji} = \frac{\sum_{c=1}^n \frac{44}{12} o_c t_c f_c x_c^i}{\sum_{c=1}^n f_c x_c^i} \times \frac{\sum_{c=1}^n f_c x_c^i}{D_p Y_i} b_{ji} \frac{X_i}{X} X \quad (12)$$

Afin de capter les changements causés par une modification du mix énergétique nous pouvons séparer les énergies utilisées en 2 catégories (combustibles fossiles excluant la production d'électricité cc et combustibles fossiles pour l'électricité, ce) cette opération nous permet d'extraire le rendement des centrales thermiques (r) du calcul. Ainsi, nous pouvons réécrire (12) comme (13)

$$S_{ji} = \frac{\sum_{cc=1}^{nc} \frac{44}{12} o_{cc} t_{cc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} \frac{44}{12} o_{ce} t_{ce} f_{ce} x_{ce}^i}{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i} \times \frac{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i}{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i} \times \frac{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i}{D_p Y_i} b_{ji} \frac{X_i}{X} X \quad (13)$$

r est le rendement des centrales thermiques; « ne » est l'ensemble des combustibles « ce » utilisés pour produire l'électricité secondaire; « nc » est l'ensemble des combustibles fossiles « cc » non utilisés pour produire l'électricité (détail des énergies contenues dans chaque ensemble dans l'annexe 4.2)

Enfin, en rajoutant les énergies propres (rr), dont la teneur en carbone est nulle, nous pouvons écrire l'équation (13) comme (14)

$$S_{ji} = \frac{\sum_{cc=1}^{nc} \frac{44}{12} o_{cc} t_{cc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} \frac{44}{12} o_{ce} t_{ce} f_{ce} x_{ce}^i}{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i} \times \frac{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i}{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i} \\ \times \frac{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i}{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i + \sum_{rr=1}^{nr} f_{rr} x_{rr}^i} \\ \times \frac{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i + \sum_{rr=1}^{nr} f_{rr} x_{rr}^i}{D_p Y_i} b_{ji} \frac{X_i}{X} X \quad (14)$$

« nr » est l'ensemble des énergies propres « rr » (détail des énergies contenues dans chaque ensemble dans l'annexe 4.2).

En appliquant l'équation (8) à l'équation (9) nous obtenons :

$$\Delta S_i = \sum_{j=1}^n \frac{(S_{ji,t+1} - S_{ji,t})}{\ln S_{ji,t+1} - \ln S_{ji,t}} \times \left[\ln \left(\frac{S_{ji,t+1}}{S_{ji,t}} \right) \right] \quad (15)$$

Notons alors que la somme des S_{ji} peut être répartie en 1) des changements de l'autoconsommation lorsque $i=j$, nous les appellerons changements internes, 2) des changements dans les CI lorsque $i \neq j$, que nous appellerons externalités. En combinant l'équation (14) et l'équation (15) nous obtenons donc :

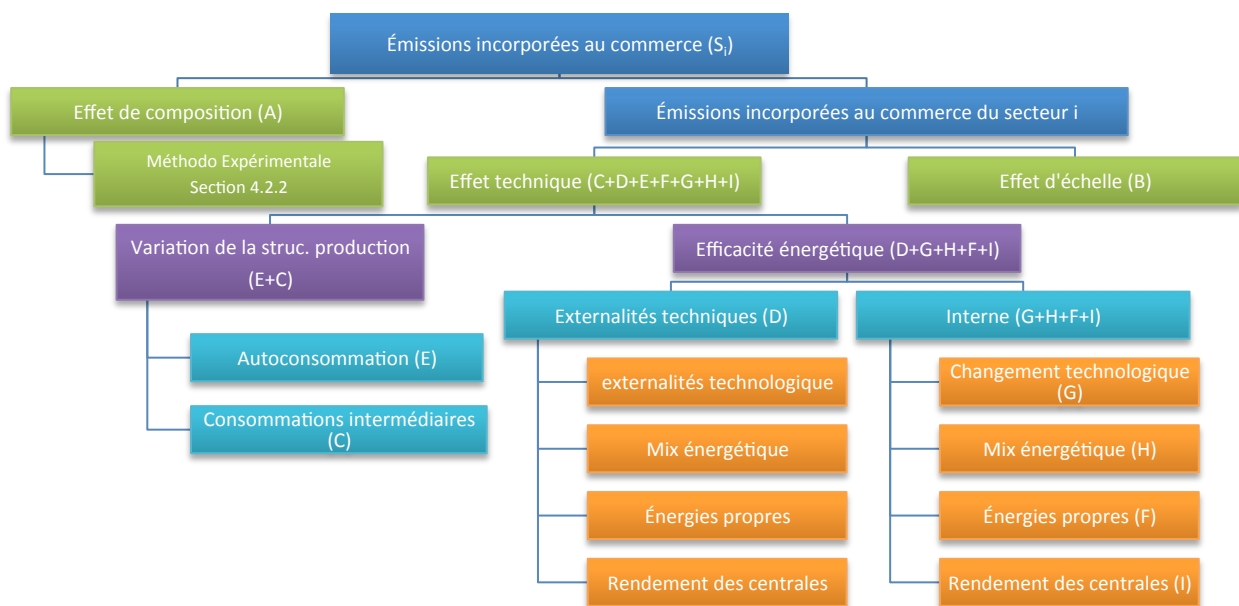
$$\begin{aligned}
 \Delta S_i = & \frac{S_{j=i,j,t+1} - S_{j=i,j,t}}{\ln S_{j=i,j,t+1} - \ln S_{j=i,j,t}} \left[\ln \left(\frac{\overbrace{\sum_{cc=1}^{nc} \frac{44}{12} o_{cc} t_{cc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} \frac{44}{12} o_{ce} t_{ce} f_{ce} x_{ce}^i}^{\text{Mix énergétique (H)}}}{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i} \right)_{t+1} + \ln \left(\frac{\overbrace{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i}^{\text{Rendement des centrales (I)}}}{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i} \right)_{t+1} \right. \\
 & \left. - \ln \left(\frac{\overbrace{\sum_{cc=1}^{nc} \frac{44}{12} o_{cc} t_{cc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} \frac{44}{12} o_{ce} t_{ce} f_{ce} x_{ce}^i}^{\text{Mix énergétique (H)}}}{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i} \right)_t + \ln \left(\frac{\overbrace{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i}^{\text{Rendement des centrales (I)}}}{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i} \right)_t \right] \\
 & + \frac{S_{j=i,j,t+1} - S_{j=i,j,t}}{\ln S_{j=i,j,t+1} - \ln S_{j=i,j,t}} \left[\ln \left(\frac{\overbrace{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i}^{\text{Ajout énergies propres (F)}}}{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i + \sum_{rr=1}^{nr} f_{rr} x_{rr}^i} \right)_{t+1} + \ln \left(\frac{\overbrace{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i + \sum_{rr=1}^{nr} f_{rr} x_{rr}^i}^{\text{Changement technologique (G)}}}{D_p y_i} \right)_{t+1} \right. \\
 & \left. - \ln \left(\frac{\overbrace{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i}^{\text{Ajout énergies propres (F)}}}{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i + \sum_{rr=1}^{nr} f_{rr} x_{rr}^i} \right)_t + \ln \left(\frac{\overbrace{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i + \sum_{rr=1}^{nr} f_{rr} x_{rr}^i}^{\text{Changement technologique (G)}}}{D_p y_i} \right)_t \right] \\
 & + \frac{S_{j=i,j,t+1} - S_{j=i,j,t}}{\ln S_{j=i,j,t+1} - \ln S_{j=i,j,t}} \ln \frac{b_{j=i,t+1}}{b_{j=i,t}} \\
 & + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \frac{S_{j=i,j,t+1} - S_{j=i,j,t}}{\ln S_{j=i,j,t+1} - \ln S_{j=i,j,t}} \ln \left(\frac{\overbrace{\sum_{cc=1}^{nc} \frac{44}{12} o_{cc} t_{cc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} \frac{44}{12} o_{ce} t_{ce} f_{ce} x_{ce}^i}^{\text{Externalités techniques (D)}}}{D_p y_i} \right)_{t+1} \\
 & - \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \frac{S_{j=i,j,t+1} - S_{j=i,j,t}}{\ln S_{j=i,j,t+1} - \ln S_{j=i,j,t}} \ln \left(\frac{\overbrace{\sum_{cc=1}^{nc} \frac{44}{12} o_{cc} t_{cc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} \frac{44}{12} o_{ce} t_{ce} f_{ce} x_{ce}^i}^{\text{Externalités techniques (D)}}}{D_p y_i} \right)_t \\
 & + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \frac{S_{ji,t+1} - S_{ji,t}}{\ln S_{ji,t+1} - \ln S_{ji,t}} \ln \frac{b_{ji,t+1}}{b_{ji,t}} + \sum_{j=1}^n \frac{S_{ji,t+1} - S_{ji,t}}{\ln S_{ji,t+1} - \ln S_{ji,t}} \ln \frac{X_{t+1}}{X_t} + \sum_{j=1}^n \frac{S_{ji,t+1} - S_{ji,t}}{\ln S_{ji,t+1} - \ln S_{ji,t}} \ln \left\{ \frac{\frac{X_i}{X}}{\frac{X_i}{X}} \right\}_{t+1} \\
 & - \sum_{j=1}^n \frac{S_{ji,t+1} - S_{ji,t}}{\ln S_{ji,t+1} - \ln S_{ji,t}} \ln \left\{ \frac{\frac{X_i}{X}}{\frac{X_i}{X}} \right\}_t
 \end{aligned} \tag{16}$$

Notons que pour plus de fluidité les correspondances (A, B, C, etc) seront utilisées dans tout le chapitre. (Pour le détail des explications de chaque effets se reporter, à l'annexe 4.3)

Notons que les résultats de l'effet de composition ainsi calculé ne pourront être utilisés qu'au niveau national. L'effet de composition fait l'objet d'une partie à part dans la suite de l'analyse, il sera alors précisé pourquoi sous cette forme il ne peut être utilisé qu'au niveau national.

4.1.2 Représentation graphique

Figure 4.1 Décomposition



Nous pouvons donc diviser les émissions incorporées en quatre niveaux (Niveau 1 en vert, niveau 2 en violet, niveau 3 en bleu ciel, niveau 4 en orange) :

- Le premier niveau de décomposition est représenté par **l'effet technique ($C+D+E+F+G+H+I$)**, **l'effet d'échelle (B)**, et **l'effet de composition (A)**. Les deux premiers peuvent être calculés par secteurs, le dernier devra faire l'objet d'un développement méthodologique supplémentaire pour obtenir des résultats par secteurs.
- Le second niveau de décomposition ne concerne que l'effet technique. Nous scindons l'effet en une partie de variation de la **structure de production ($E+C$)** et une partie concernant **l'efficacité énergétique de la production ($D+F+G+H+I$)**.
- Au troisième niveau, ces deux composantes de l'effet technique sont divisées en deux parties,

les variations d'émissions internes et les externalités. Pour la structure de production, nous les appellerons **variation de l'autoconsommation (E)** ou **variation des consommations intermédiaires (C)**. Concernant l'efficacité énergétique, ce seront les **variations internes (F+G+H+I)** et les **variations dues aux externalités techniques (D)**

- Enfin, le dernier niveau de décomposition concerne l'efficacité énergétique qui pourra provenir **d'une amélioration technologique (G)**, d'un **changement de combustible (H)**²⁷, de **l'utilisation d'énergies renouvelables (F)** ou nucléaires, ou d'une **amélioration du rendement des centrales électriques (I)**.

4.2 Les trois effets sur le commerce.

La corrélation entre commerce et environnement par le biais de l'effet technique, de l'effet de composition, et de l'effet d'échelle dirigera notre analyse. Nous commençons par présenter la situation générale des émissions incorporées au commerce entre la France et la Chine avec en particulier un effet d'échelle dominant (**Section 4.3.1**). Puis nous réalisons une analyse de l'effet de composition du commerce, en particulier avec l'extraction d'informations nous permettant de comprendre ses variations (**Section 4.3.2**). Nous finissons par une analyse poussée de l'effet technique chinois (**Section 4.3.3**) et français (**Section 4.3.4**).

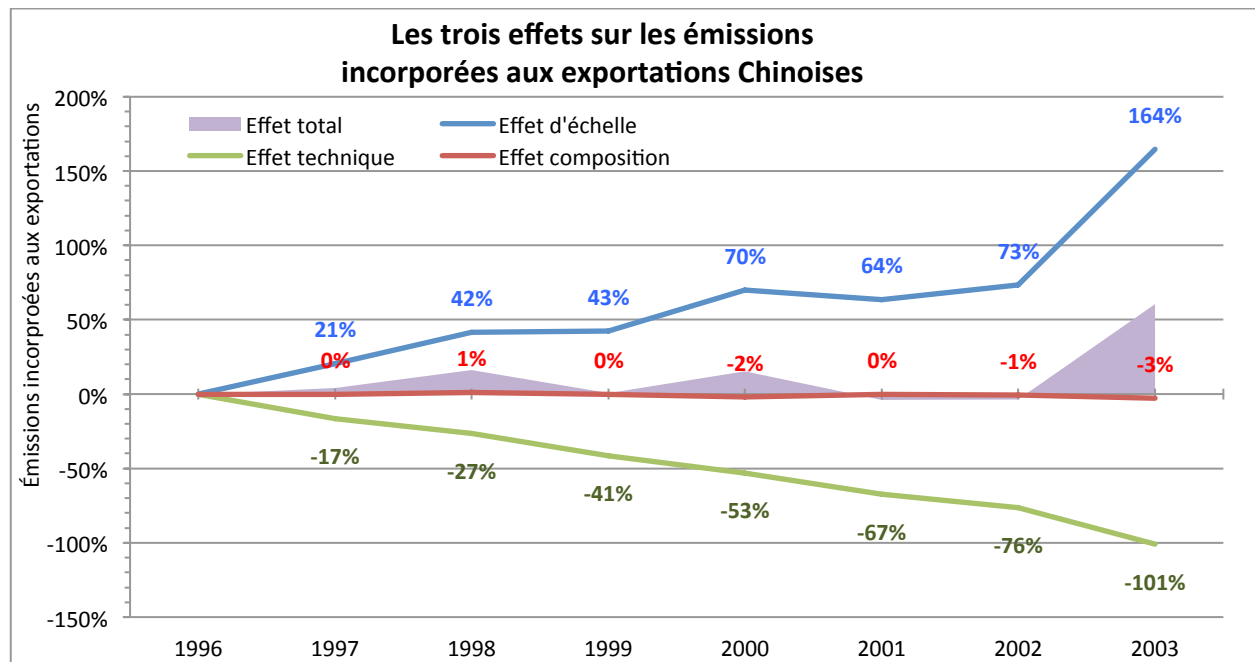
4.2.1 Domination de l'effet d'échelle

En 1996, les exportations de produits chinois vers la France totalisent 1,9 G\$ et 7,7 MtCO₂. En 2003, ces exportations ont triplé pour atteindre 7,3 G\$, pourtant les émissions de CO₂ n'augmentent que de 61%, avec 12,6 MtCO₂ incorporées dans les exportations (figure 3.3 et figure 3.4, chapitre 3).

Sur la figure 4.2 nous représentons la décomposition des émissions incorporées aux exportations chinoises vers la France.

Figure 4.2 Les trois effets sur les émissions incorporées aux exportations chinoises

²⁷ Cette notion est aussi appelée **mix énergétique**

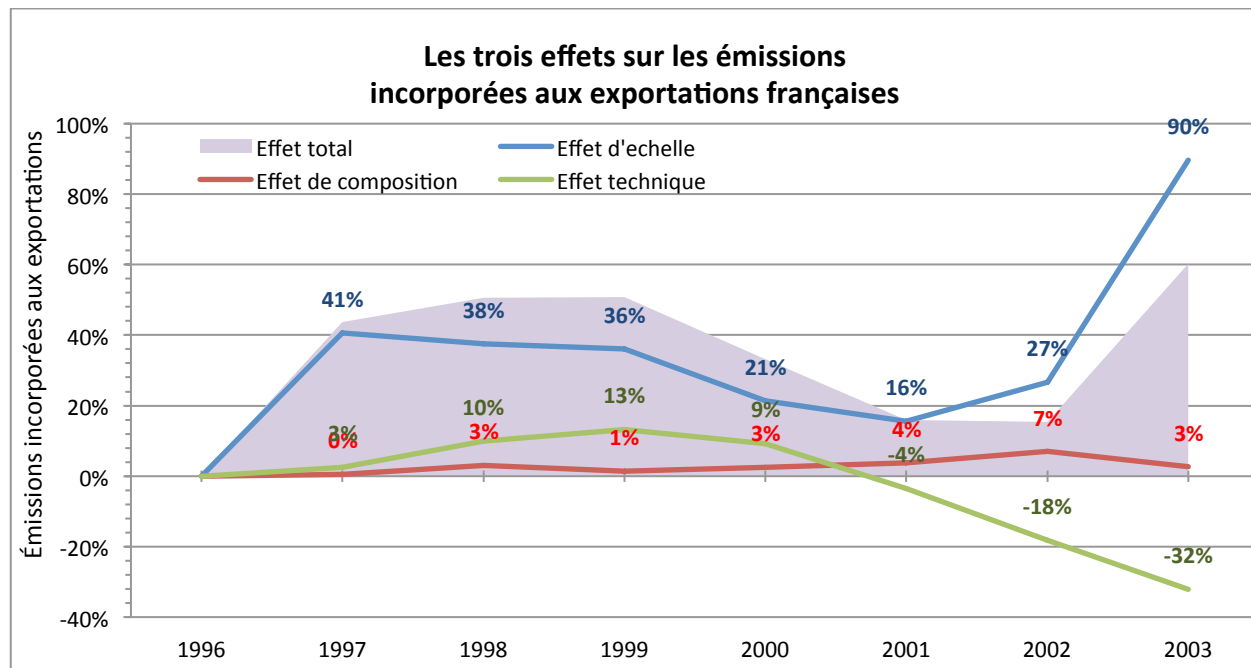


L'augmentation des exportations chinoises a un impact sur ses émissions incorporées au commerce, elle crée un effet d'échelle (B) qui augmente les émissions incorporées au commerce chinois de 164% par rapport à l'année de base 1996. Cet effet est cependant contrecarré par l'effet technique (C+D+E+F+G+H+I) qui réduit de son côté les émissions de 101% par rapport à la base 1996. Enfin, durant cette période la composition du commerce (A) se modifie pour réduire les émissions incorporées au commerce par rapport à 1996.

Côté français les résultats sont plus étonnants, en effet, les exportations passent de 2,4 à 5,1 G\$ entre les années 1996 et 2003. Ainsi, la France exporte respectivement en Chine 595 et 953 KtCO₂ (figure 3.3 et figure 3.4 chapitre 3).

La figure 4.3 représente la décomposition des émissions incorporées aux exportations françaises vers la Chine.

Figure 4.3 Les trois effets sur les émissions incorporées aux exportations françaises

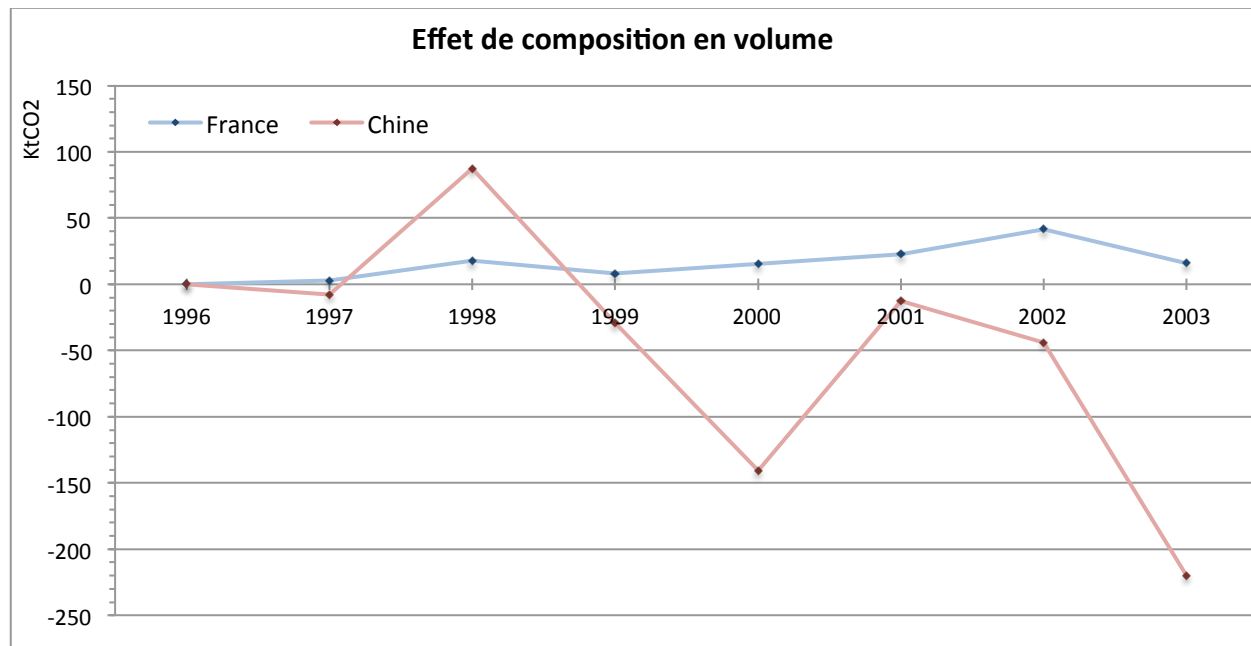


L'évolution du commerce français n'est pourtant pas aussi linéaire que celle de la Chine. Entre 1997 et 2001, suite au déclin des exportations, l'effet d'échelle (B) joue à la baisse sur les émissions incorporées françaises. Au contraire, l'effet technique (C+D+E+F+G+H+I) impose une augmentation des émissions de CO₂ incorporées au commerce durant les années 1996 à 1999, et s'en suit une amélioration notable passé 1999. La modification de la composition du commerce (A) entraîne elle aussi une augmentation des émissions incorporées aux exportations entre 1996 et 2003. Tout comme pour la Chine, il semble que l'effet d'échelle soit dominant, et la courbe des émissions incorporées aux exportations françaises subit alors la variation des exportations au fil des années. (Les résultats détaillés de la décomposition en trois effets sont consultables dans l'annexe 4.4).

4.2.2 L'analyse de l'effet de composition

En France comme en Chine la figure 4.2 et la figure 4.3 présentent un effet de composition (A) marginal par rapport aux effets d'échelle (B) et technique (C+D+E+F+G+H+I). En effet, la figure 4.4 présente des variations globales de faible amplitude, mais nous verrons que les variations sectorielles en volume sont loin d'être légères.

Figure 4.4 Volume de l'effet de composition



Sur la période 1996 à 2003, l'effet de composition chinois est bénéfique pour les exportations chinoises avec une accumulation de 367 KtCO₂ retirées des exportations, qui signifie un ajustement des structures d'exportation vers des secteurs moins polluants. Notons qu'il augmente les émissions incorporées au commerce seulement en 1998, avec +87KtCO₂. Par contre, nous observons le cas inverse pour les exportations françaises, c'est un total cumulé de +124 KtCO₂ qui sont ajoutées aux exportations vers la Chine.

Après avoir pris connaissance des résultats globaux, il serait intéressant de pouvoir mener une analyse sectorielle. Cependant, notre modèle sous sa forme actuelle est limité dans le calcul de l'effet de composition sectoriel. Nous allons donc i) développer une méthodologie d'analyse expérimentale concernant l'effet de composition. ii) Présenter les résultats France-Chine en découlant.

i- Méthodologie d'analyse expérimentale de l'effet de composition

Dans cette section, nous allons montrer que le modèle actuellement développé ne fournit que des résultats limités concernant l'effet de composition sectoriel. Nous redévelopperons ensuite la méthodologie afin de remédier à cette limite.

L'intuition derrière l'effet de composition est simple. Si la part des exportations d'un secteur très peu polluant augmente, l'effet de composition diminue. En effet, toutes les parts d'exportation des autres secteurs (qui sont donc relativement plus polluants) diminuent, et la somme de ces baisses provoque une baisse générale des émissions captées par l'effet de composition. D'autres cas de figure peuvent être développés et relèvent d'intuitions exactement similaires.

Le problème de l'effet de composition développé dans le modèle LMDI est qu'il ne suit pas ces intuitions. Rappelons l'équation de l'effet de composition sectoriel, tel qu'obtenu grâce au modèle développé dans la partie précédente.

$$\eta_i = \sum_{j=1}^n \frac{(S_{ji,t+1} - S_{ji,t})}{\ln S_{ji,t+1} - \ln S_{ji,t}} \ln \frac{\left\{\frac{X_i}{X}\right\}_{t+1}}{\left\{\frac{X_i}{X}\right\}_t}$$

η_i est l'effet de composition du secteur i , calculé suivant l'équation (16)

Cette formulation est évidemment incomplète. En effet, quelle que soit l'intensité relative du secteur i , η_i augmente (respectivement, baisse), pour chaque hausse (respectivement, baisse) de X_i/X du temps t à $t+1$.

Or, considérons l'étude d'un secteur k appartenant à l'ensemble des secteurs $i \in [1, 2, \dots, k, \dots, n]$. Si toute chose est égale par ailleurs, une variation de X_k de la période t à $t+1$ provoquera :

- Une variation proportionnelle de X_k/X , et donc une variation de même signe de η_k
- Une variation inverse et proportionnelle de l'ensemble des X_i/X pour les secteurs $i \neq k$, et donc une variation inverse des tous les η_i pour $i \neq k$.

Comme η_k ne prend pas en compte l'ensemble de ces variations, provoquées par l'augmentation des exportations du secteur k , nous pouvons conclure qu'il n'est pas un bon indicateur de l'effet de composition sectoriel.

Lors de nos recherches, nous n'avons trouvé aucune méthode pour calculer l'effet de composition de chaque secteur. **Nous découvrons ici une limite à la méthodologie de la LMDI appliquée à**

l'étude des émissions de CO2 incorporées au commerce international.

Pour remédier à cette limite, nous devons développer une méthodologie nous permettant de calculer quels secteurs sont responsables des hausses ou baisses de l'effet de composition, toutes variations inverses prises en compte. Nous avons alors mis au point une méthode expérimentale pour le calcul de *l'effet de composition sectoriel net*.

Commençons par approximer la variation de l'effet de composition total pour une hausse de 1% de la part des exportations du secteur i :

$$AP1_i = \frac{\left\{\frac{X_i}{X}\right\}_{t+1} \rightarrow \left\{\frac{X_i}{X}\right\}_{t+1} + 0,01}{\left\{\frac{X_i}{X}\right\}_t} \lim_{\left\{\frac{X_i}{X}\right\}_t} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{(S_{ji,t+1} - S_{ji,t})}{Ln S_{ji,t+1} - Ln S_{ji,t}} \ln \frac{\left\{\frac{X_i}{X}\right\}_{t+1}}{\left\{\frac{X_i}{X}\right\}_t} \quad (17)$$

$AP1_i$ est l'approximation de la variation de l'effet de composition total pour une augmentation de 1% de la part des exportations du secteur i .

Grâce à l'approximation nous pouvons désormais ré-estimer la part de chaque secteur dans l'effet de composition national :

$$\eta_i^{net} : \frac{AP1_i \times \frac{\left\{\frac{X_i}{X}\right\}_{t+1}}{\left\{\frac{X_i}{X}\right\}_t}}{\sum_{i=1}^n AP1_i \times \frac{\left\{\frac{X_i}{X}\right\}_{t+1}}{\left\{\frac{X_i}{X}\right\}_t}} \times \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{(S_{ji,t+1} - S_{ji,t})}{Ln S_{ji,t+1} - Ln S_{ji,t}} \ln \frac{\left\{\frac{X_i}{X}\right\}_{t+1}}{\left\{\frac{X_i}{X}\right\}_t} \quad (18)$$

η_i^{net} est l'effet de composition du secteur i net des variations de la composition des autres secteurs.

Cette méthodologie permet désormais de prendre en compte, l'ensemble des variations de l'ensemble des secteurs, dans l'estimation de l'impact de l'effet de composition sectoriel. Notons que ce type d'approche a l'avantage d'offrir une estimation plus réaliste et intuitive de l'effet de

composition sectoriel, cependant elle peut être critiquée de plusieurs manières :

- Premièrement, les résultats sectoriels ne sont pas compatibles avec le modèle LMDI général, i.e. on ne peut pas ajouter l'effet de composition net avec les autres effets pour retrouver la variation totale.
- Seconde critique, l'approximation diffère suivant la hausse de $\left\{\frac{X_i}{X}\right\}_{t+1} / \left\{\frac{X_i}{X}\right\}_t$ pris en compte dans la limite (dans notre étude nous considérons 1%). Après avoir testé plusieurs valeurs, la différence s'avère cependant marginale dans le résultat final.

ii- Résultats

Cette méthode expérimentale va nous permettre d'obtenir des résultats de meilleure qualité et plus en accord total avec nos intuitions de base. Le tableau 4.1 résume les résultats de l'effet de composition, et ceux obtenus par le calcul de l'effet de composition net.

Table 4.1 Effet de composition sectoriel chinois

1996 - 2003	Intensité totale 2003 (KtCO ₂ / M\$)	X _i (1996 en M\$)	X _i (2003 en M\$)	$\frac{\left\{\frac{X_i}{X}\right\}_{2003}}{\left\{\frac{X_i}{X}\right\}_{1996}} - 1$	η_i^{net} (KtCO ₂)	η_i (à titre indicatif)
Agriculture	1,1 (faible)	30	34	-70%	225	-56
Extraction	2,5 (haute)	23	24	-73%	-56	-110
Agroalimentaire	1,3	120	104	-77%	807	-310
Textiles	1,5	545	1308	-38%	948	-843
Produits du bois	1,6	41	69	-56%	50	-106
Pâtes, papier	2,1	8	21	-34%	-10	-16
Produits énergétiques	2,8	19	105	43%	81	59
Chimie	2,9	127	317	-35%	-850	-426
Articles en plastique	2,2	91	194	-45%	-74	-230
Prod. minéraux	6,2	30	62	-46%	-427	-188
Sidérurgie	5,1	5	27	51%	100	36
Ouvrages en métaux	3,0	81	220	-30%	-303	-196
Machines NCA	2,2	129	577	16%	119	130
Mach. informat.	1,3	89	2116	520%	-420	2201
Mach. électriques	1,8	74	407	42%	65	168
Mat. de com.	1,1	155	894	50%	-524	264
Inst.de précision	1,5	76	192	-35%	37	-125
Mat. de Transport	2,0	39	205	37%	46	81

Autre manuf.	1,9	224	456	-47%	-34	-550
TOTAL	-	1 907	7 330	-	-220	-220

Nous pouvons tirer de nombreuses conclusions du tableau 4.1. D'ores et déjà, concernant la méthodologie nous remarquons quatre cas de figure concernant η_i et η_i^{net} . Nous regroupons ces cas de figure au sein du tableau 4.2.

Table 4.2 Différences entre η_i et η_i^{net} pour la Chine

	1 ^{er} cas	2 ^{de} cas	3 ^e cas	4 ^e cas
Intensité ²⁸	faible	faible	haute	haute
$\frac{\{X_i\}}{\{X\}}_{t+1} / \frac{\{X_i\}}{\{X\}}_t$	en baisse	en hausse	en baisse	en hausse
Intuition : signe de η	positif	négatif	négatif	positif
η_i	négatif	positif	négatif	positif
η_i^{net}	positif	négatif	négatif	positif
Exemples de secteurs	<ul style="list-style-type: none"> • agriculture • textiles • agroalimentaire • bois • instr. précision 	<ul style="list-style-type: none"> • machines informat. • matériel de comm. 	<ul style="list-style-type: none"> • extraction • papier • chimie • plastiques • minéraux • métaux • autres manuf. 	<ul style="list-style-type: none"> • produits NRJ • sidérurgie • machines nca • matériel de transport • machines électriques

Dans la moitié des cas de figure les résultats de η_i ne suivent pas les intuitions économiques derrière l'effet de composition. Alors que η_i^{net} présente des résultats beaucoup plus encourageants et en accord avec les intuitions économiques.

Maintenant au niveau des résultats, nous pouvons observer qu'en Chine la plus importante hausse d'exportation concerne le secteur de la micro-informatique (89 M\$ à 2,1 G\$). Ainsi, la part du secteur dans les exportations chinoises passe de 5 à 29%. En 2003, ce secteur étant relativement moins polluant que les autres l'effet de composition expérimental nous indique qu'il impute une baisse de 420KtCO₂ aux émissions incorporées au commerce avec la France.

À l'inverse, le secteur des textiles est relativement moins polluant que les autres et la part de ses

²⁸ La mention intensité faible ou haute a été sélectionnée à titre indicatif, en fonction des intensités de 2003 et relativement au pays étudié. Le modèle prenant en compte une série bien plus large de paramètres (intensité 1996, volume commercial, Leontiefs, etc.), les résultats pourraient varier en fonction de paramètres qui n'ont pas été exposés dans le tableau.

exportations passent de 29 à 18% sur la période. L'effet de composition expérimental nous indique que cette faiblesse dans les exportations de textile impute une hausse spectaculaire de 948KtCO₂ aux émissions incorporées au commerce sur la période 1996 à 2003. Enfin, le secteur de la chimie voit ses exportations baisser, et la part dans le commerce passer de 7 à 4%, on pourra considérer que cette diminution diminue aussi les émissions incorporées au commerce de 850KtCO₂.

Le tableau 4.3 présente les données françaises sur la période 1996 à 2003.

Table 4.3 Effet de composition sectoriel français

1996 - 2003 (Cas de figure du tableau 4.6 en indice)	Intensité totale 2003 (KtCO ₂ / M\$)	X ₁₉₉₆ (M\$)	X ₂₀₀₃ (M\$)	$\frac{\left\{\frac{X_i}{X}\right\}_{2003}}{\left\{\frac{X_i}{X}\right\}_{1996}} - 1$	η_i^{net} (KtCO ₂)	η_i (à titre indicatif)
Agriculture ⁴	0,25 (haute ²⁹)	31	97	50%	1	6
Extraction ¹	0,19 (faible)	4	4	-52%	0	-1
Agroalimentaire	0,24	55	123	10%	0	2
Textiles ²	0,13	30	128	110%	-2	7
Produits du bois	0,15	2	6	75%	0	0
Pâtes, papier ⁴	0,20	25	76	45%	0	4
Produits énergétiques ⁴	0,44	2	19	398%	3	6
Chimie ³	0,34	311	443	-31%	-19	-53
Articles en plastic ²	0,14	16	85	153%	-1	6
Prod. minéraux ⁴	0,26	31	64	1%	0	0
Sidérurgie ⁴	0,97	55	183	63%	33	54
Ouvrages en métaux ¹	0,17	87	107	-40%	1	-9
Machines NCA ¹	0,14	736	882	-42%	22	-67
Mach. informat. ¹	0,09	35	39	-46%	2	-2
Mach. électriques ²	0,13	193	519	31%	-3	14
Mat. de com. ²	0,11	104	648	205%	-20	38
Inst.de précision ²	0,10	88	201	11%	-1	2
Mat. de Transport	0,14	684	1 406	0%	0	0
Autre manuf. ²	0,12	6	88	607%	-2	8
TOTAL	-	2 494	5 116	-	16	16

²⁹ La mention intensité faible ou haute a été sélectionnée à titre indicatif, en fonction des intensités de 2003 et relativement au pays étudié. Le modèle prenant en compte une série bien plus large de paramètres (intensité 1996, volume commercial, Leontiefs, etc.), les résultats pourraient varier en fonction de paramètres qui n'ont pas été exposés dans le tableau.

Concernant la France, notons que le plus grand changement est celui de la hausse des exportations de produits issus du secteur de la sidérurgie, la part des exportations passe de 2 à 4% entre 1996 et 2003, ce qui augmente les émissions incorporées au commerce de 33 KtCO₂.

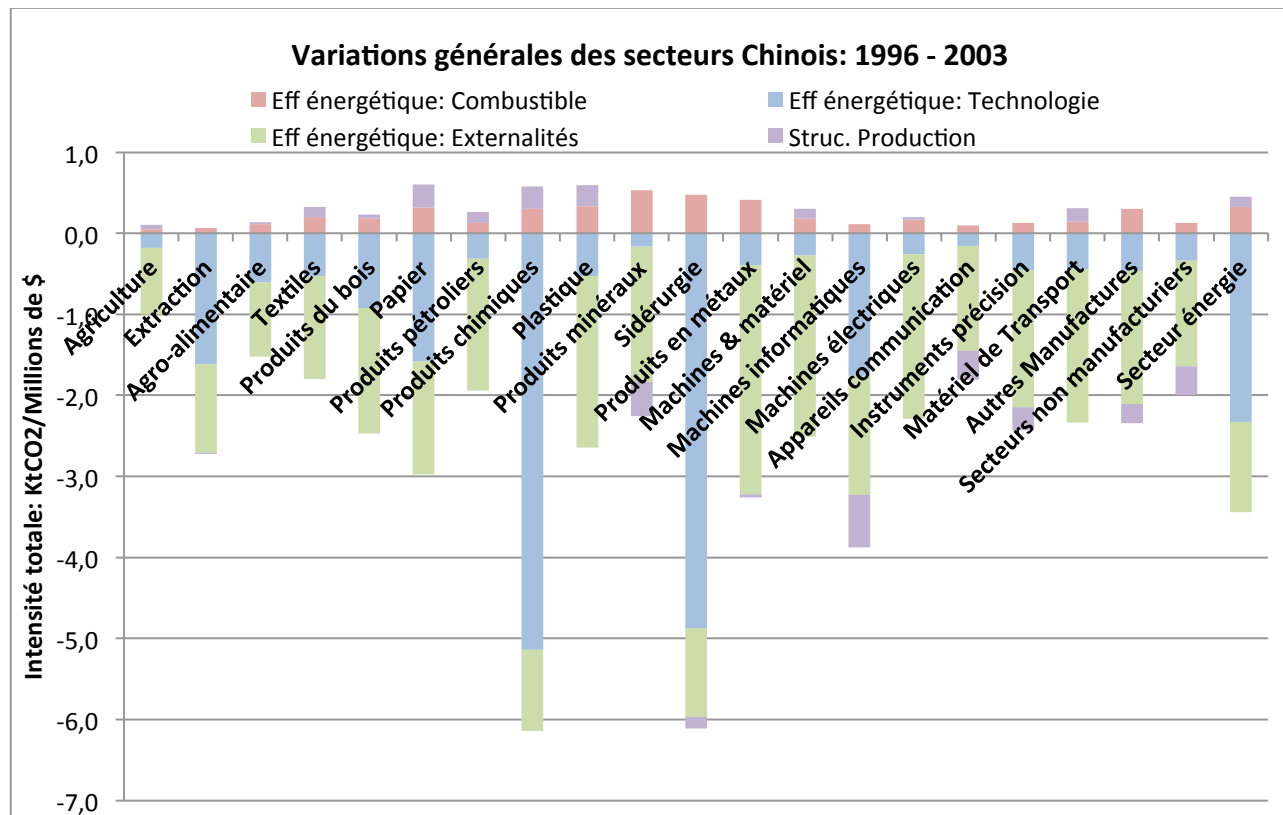
Notons la réduction de la part des machines non classées ailleurs (NCA) qui passe de 30 à 17%. Ce secteur est relativement moins intensif en carbone que les autres, il impute donc une hausse de 22 KtCO₂ aux émissions incorporées aux exportations vers la Chine. De la même façon, l'augmentation des exportations du secteur des appareils de communication réduit l'effet de composition de 20 KtCO₂.

En conclusion nous pouvons noter que l'effet de composition agit de façon complexe. En effet, la variation des exportations d'un seul secteur modifie l'ensemble de la composition des exportations du pays, si bien que le modèle LMDI classique ne parvient pas à détecter les variations de CO₂ qui en retourne. Nous développons dans cette section une méthodologie expérimentale qui à première vue offre des résultats plus en accord avec les intuitions économiques. La méthodologie développée est toutefois encore sujette à critique, et gagnerait donc à être encore améliorée, voir confrontée à d'autres méthodologies similaires afin d'estimer sa robustesse.

4.2.3 L'effet technique chinois

De 1996 à 2003, l'intensité d'émission nationale chinoise est passée de 353 à 1 790 tCO₂/M\$ (tableau 3.1, chapitre 3). Le graphique 4.5 présente l'ensemble des variations sectorielles de la période 1996-2003 que nous avons regroupé en 4 catégories : 1) le changement technologique (G), 2) les externalités techniques (D) 3) les variations de CI et d'autoconsommation appelées structure de production (C+E); 4) le changement de combustibles (H+F+I).

Figure 4.5 Variations de l'intensité totale chinoise, de 1996 à 2003 (Valeurs en annexe 4.5)



Remarquons que les secteurs de la sidérurgie et des produits chimiques totalisent les plus grosses baisses d'intensité, dont respectivement 82 et 84% sont dues au changement technologique. Par le biais des externalités, d'autres secteurs profitent de ces baisses d'intensité, nous voulons donc décrire

- comment ces variations affectent l'émission de CO2 incorporée au commerce ? (Section i).
- Comment les changements dans l'utilisation des CI affectent-ils à la baisse les émissions incorporées ? (Section ii)
- Enfin, nous voulons décrire l'augmentation d'intensité d'émission due aux changements de combustibles. Pouvons-nous intuitivement en déterminer la cause ? (Section iii)

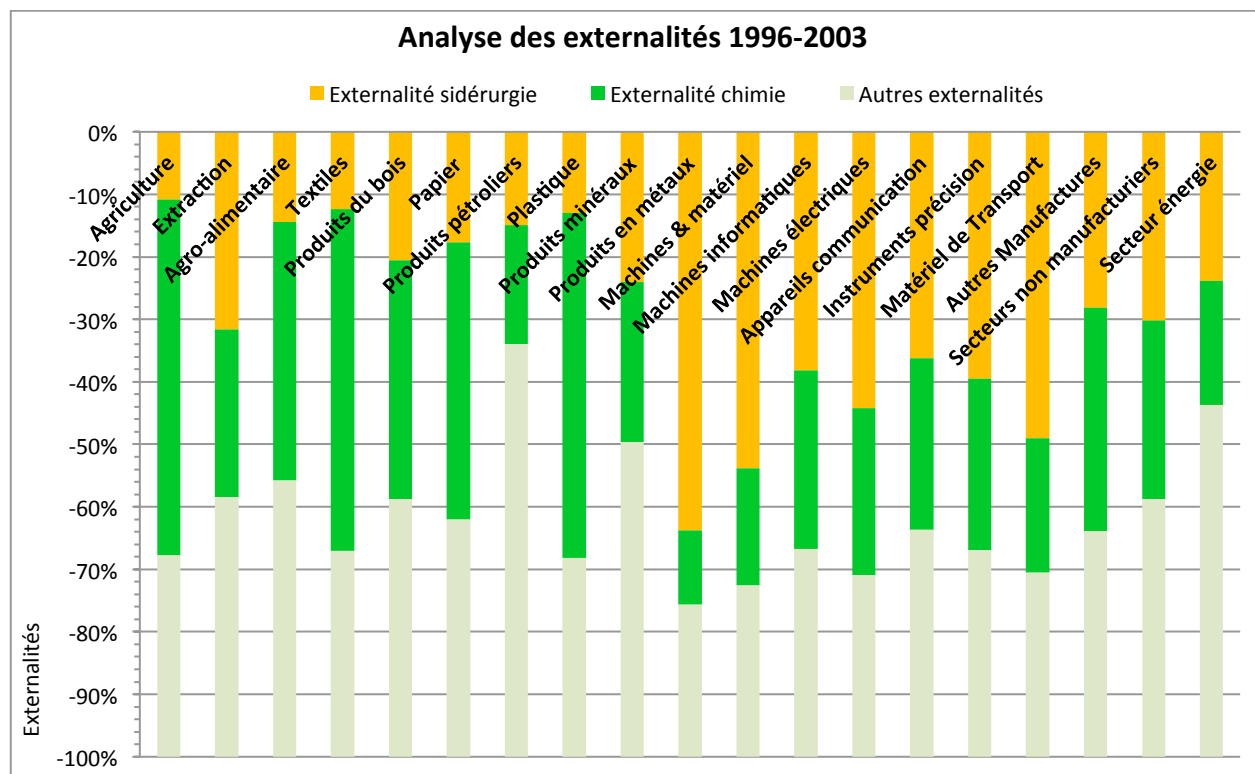
i) Répercussions de l'amélioration technologique des secteurs chimie et sidérurgie

Sur notre division de 21 secteurs productifs, les secteurs manufacturiers des produits chimiques et de la sidérurgie fournissent respectivement 6,9% et 8,3% de l'output national de 1996, c'est respectivement 8,5% et 8,4% en 2003. Cependant en 1996, le secteur des produits chimiques est

responsable de 17,4% des émissions incorporées à la production chinoise, celui de la sidérurgie totalise 26,2% des émissions. En 2003 les taux sont de respectivement 11,3% et 25,4%. Ces deux secteurs fournissent à eux seul, plus d'un tiers des émissions incorporées à la production chinoise. Intuitivement la baisse d'intensité d'émission de ces secteurs devrait pouvoir facilement se répercuter sur les autres.

C'est par le biais des externalités (D) que le changement technologique du secteur chimique et du secteur sidérurgique affecte les émissions des autres secteurs. Il nous est possible de retracer l'impact de leurs variations technologiques sur l'effet technique de chaque secteur. Nous présentons les résultats sur la figure 4.6

Figure 4.6 Les changements technologiques du secteur chimique et sidérurgique sur les externalités des autres secteurs, 1996 - 2003



Notons l'impact considérable de l'amélioration technologique de la sidérurgie sur les externalités des produits en métaux (64% des externalités proviennent du secteur sidérurgique); des machines & matériel (54%); des machines électriques (44%); du matériel de transport (49%); et des

appareils de communication et de précision (36% et 39%). Quant au secteur de la chimie, il affecte 57% des externalités agricoles, 55% de celles des textiles et des produits plastiques, 44% pour le secteur du papier, 41% pour l'agroalimentaire, et 38% pour les produits en bois.

De 1996 à 2003, la sidérurgie et la chimie comptent pour respectivement 30,6% et 26,1% de la variation totale de l'intensité chinoise. Nous découvrons alors un résultat étonnant puisqu'en 2003, 1,79 MtCO₂ incorporées au commerce ont été sauvées par l'amélioration technologique du secteur de la sidérurgie. Pourtant, la Chine n'exporte presque pas de produits issus de ce secteur vers la France, il compte pour 0,36% des exportations de 2003, et n'incorpore que seulement 0,13 MtCO₂. Le secteur de la chimie a quant à lui permis une réduction de 2,68 MtCO₂, pour 0,92 MtCO₂ incorporées aux exportations de 2003.

ii) La variation de la consommation intermédiaire

Sur la figure 4.5 nous remarquons que la structure de consommation intermédiaire (C+E) affecte à la hausse ou à la baisse l'effet technique; dans cette catégorie nous retenons le secteur du matériel informatique et le secteur des textiles sur le tableau 4.4.

Table 4.4 Variation de la CI du secteur informatique et textile, Chine 1996-2003

CI du secteur de la micro-informatique.	Variation des CI	Variation du CO ₂ incorporé au commerce (Tonnes)
Produits informatique (Autoconsommation)	+7%	18 352
Produits chimiques	+4%	47 597
Appareils de com.	+3%	2 681
Produits énergétiques	+1%	7 885
Produits non manuf.	+1%	1 642
Produits du bois	0%	676
Produits pétroliers	0%	-740
Produits agro-ali	0%	-349
Produits papier	0%	-1 140
Inst. de précision	0%	-525
Produits agricoles	-1%	-1 715
Matériel transport	-1%	-1 676

CI du secteur des textiles.	Variation des CI	Variation du CO ₂ incorporé au commerce (Tonnes)
Produits du bois	+98%	1 525
Produits info	+72%	817
Produits énergétiques	+65%	49 060
Produits pétroliers	+41%	13 843
Produits chimiques	+34%	116 625
Machines électriques	+34%	555
Produits du papier	+33%	6 713
Produits extraction	+26%	20 496
Produits non manuf.	+17%	21 343
Produits agro-ali.	+14%	2 779
Produits agricoles	+5%	3 813
Produits textiles (Autoconsommation)	-2%	-12 937

Produits des autres Manufactures	-1%	-4 442
Produits en métaux	-1%	-4 221
Produits d'extraction	-2%	-16 540
Produits textiles	-2%	-4 252
Produits plastique	-4%	-10 208
Produits minéraux	-4%	-98 910
Machines électriques	-6%	-4 920
Produits sidérurgiques	-11%	-219 268
Machines & matériel	-12%	-12 881
TOTAL	n.a	-302 954 tonnes

Produits sidérurgiques	-4%	-6 828
Matériel transport	-13%	-685
Matériel de com.	-14%	-50
Ouvrages en métaux	-23%	-2 603
Machines & matériel	-25%	-2 627
Articles en plastic	-44%	-7 680
Produits des autres manufactures	-52%	-6 780
Inst. de précision	-60%	-368
Produits minéraux	-63%	-88 631
TOTAL	n.a	+108 379 tonnes

Pour les secteurs textiles et informatiques les plus grosses baisses de CI sont à noter dans la consommation de machines et matériel, de produits sidérurgiques, de machines électriques et de produits minéraux. Mais c'est en particulier la baisse de la consommation de produits sidérurgique et des produits minéraux non métalliques qui permettent de réduire l'essentiel du CO₂ incorporé aux exportations françaises.

Un autre secteur très intéressant du point de vue de cette analyse est le secteur des textiles, la variation de sa structure de consommation a incorporé 108 KtCO₂ supplémentaires aux exportations chinoises vers la France. En effet, entre 1996 et 2003 le secteur aura augmenté sa consommation de produits non manufacturés de 14% (+21 KtCO₂), utilise 65% d'énergie et d'eau en plus (+49 KtCO₂), et 34% de produits chimiques supplémentaires (+ 116 KtCO₂). Le secteur des textiles a aussi réduit de 64% sa consommation de produits minéraux non métalliques (-88 KtCO₂), mais cela ne suffit pas à compenser les hausses des autres secteurs.

iii) Le changement de combustible

Dernière remarque provenant de la figure 4.5, l'augmentation des émissions de CO₂ incorporées aux exportations chinoises et provenant d'un changement combustible (F+H+I). Dans ce registre un complément d'étude est nécessaire, car notre modèle n'est pas capable d'identifier quelle substitution d'énergie provoque ces changements. Nous allons cependant tenter d'apporter des éléments par l'étude de nos données.

Ainsi, nous avons comptabilisé la consommation d'énergie provenant du charbon, du gaz naturel, et du pétrole par la Chine en 1996 et 2003. Fait étonnant, il s'avère que la consommation d'énergie par le charbon a baissé de respectivement 71% à 60%. La consommation de pétrole passe de 22 à 32% sur la même période de temps et celle du gaz naturel reste stable. Nous devrions alors relever une diminution des émissions incorporées au commerce.

Ce n'est pourtant pas le cas, car un autre fait marquant vient contrebalancer l'effort de réduction de la consommation de charbon. Il s'agit de la consommation plus importante d'électricité dans la production. Elle passe de 12% en 1996 à 17% en 2003. Or, l'électricité chinoise ne fonctionne qu'essentiellement à base de charbon et, pour une même quantité d'énergie, l'électricité à base de charbon émet 3 fois plus de CO₂ que le charbon lui-même (Effet de joule et pertes du réseau).

Nous pouvons alors déduire que l'augmentation de la consommation d'électricité à base de charbon en Chine est responsable de l'augmentation de l'intensité totale d'émission, et par conséquent d'une augmentation des émissions incorporées au commerce. Sur ce point, un complément d'étude ainsi qu'un développement plus précis du modèle, permettrait de mesurer la responsabilité de 1) l'augmentation de l'utilisation d'électricité, 2) la substitution du charbon par du pétrole dans l'industrie.

4.2.4 Effet technique français

Nous avons vu que l'effet technique augmente durant les 3 premières années de l'étude, puis diminue très fortement. Dans le détail, les variations de chaque secteur sont différentes. Sur les années 1997, 1998 et 1999, l'intensité de l'ensemble des secteurs de l'économie augmente sensiblement. La plus importante hausse est celle du secteur informatique qui atteint en 2000 un pic de 169% de la valeur de 1996; passé l'année 2000 l'intensité du secteur diminue progressivement jusqu'à 129% de sa valeur de 1996 en 2003. L'étude plus approfondie de cette hausse nous a révélé qu'en 2000 l'augmentation de l'intensité d'émission du secteur non manufacturier est responsable de plus de 51% de la hausse de l'intensité du secteur informatique. Pourtant le secteur non manufacturier ne possède pas une intensité d'émission élevée, comment peut-il affecter à ce point les autres secteurs ? (Détail dans l'annexe 4.5)

Contrairement à la structure de l'économie chinoise nous remarquons alors que le secteur non manufacturier français, que nous considérons comme le secteur des services, est un secteur primordial de l'économie française. En effet, en 1996 le secteur fournit 21% de l'output des autres secteurs et 24% de l'output total de l'économie; en 2003 c'est respectivement 24% et 28%. Il est alors fort probable qu'une hausse de l'intensité d'émission de ce secteur puisse se répercuter sur tous les autres assez facilement. Selon nos données, en 1996, le secteur des produits manufacturés fournit plus de 26% du CO₂ incorporé aux exportations avec la Chine, et cela augmente à 28% en 2003. En Chine la situation est radicalement différente puisque le secteur des services ne fournit que 13% de l'output en 1996, et 15% en 2003, cela représente respectivement 5 et 8% des émissions incorporées aux exportations vers la France.

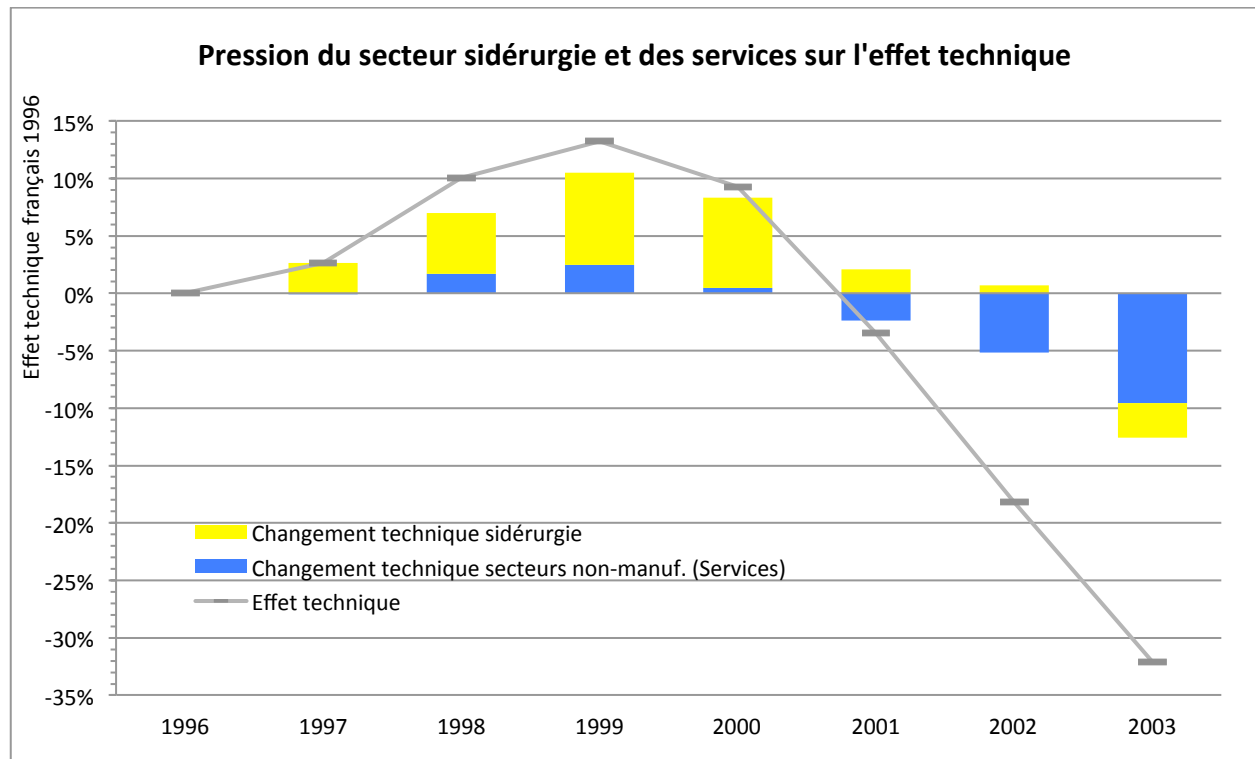
Notons dans la même catégorie qu'un autre secteur influence grandement l'effet technique français, c'est celui de la sidérurgie. Malgré le fait que l'output de ce secteur soit relativement moins élevé qu'en Chine (en 1996, la sidérurgie fournit

4,5% de l'output français, contre 8,3% en Chine, l'écart se creuse avec 4% contre 8,5% en 2003), il fournit 26% des émissions de CO₂ incorporées aux exportations françaises en 1996, 33% en 2003.

Nous découvrons que l'économie post-industrielle française implique que les intensités d'émission totale de nombreux secteurs subissent des répercussions induites par les variations d'intensité du secteur des services et de la sidérurgie. À quel point cette variation influence-t-elle les émissions de CO₂ incorporées aux exportations françaises ?

Sur la figure 4.7 nous isolons des variations de l'intensité totale (C+D+E+F+G+H+I) française, la variation dû au secteur des services; et celle due à la sidérurgie.

Figure 4.7 Pression du secteur Sidérurgie et secteur des services sur l'effet technique français 1996 - 2003.



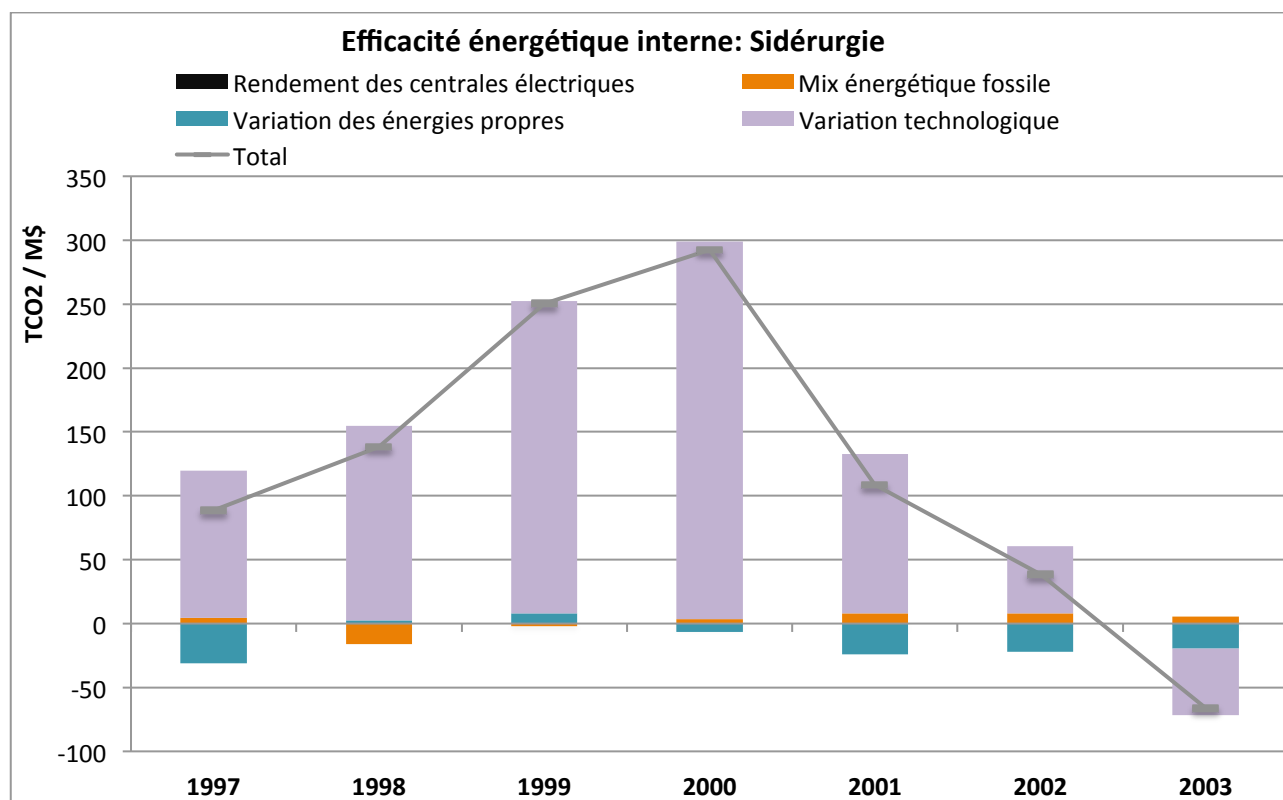
La figure 4.7 présente **l'effet technique** (C+D+E+F+G+H+I) français avec pour base 100 en 1996 les 594 KtCO₂ incorporé aux exportations françaises. Nous retrouvons sur le graphique la courbe de l'effet technique français vu dans la figure 4.3, mais aussi la contribution des secteurs de la sidérurgie et des services. La différence entre la courbe de l'effet technique et la contribution des deux secteurs représentés est la contribution de tous les autres secteurs de l'économie. Ainsi, nous remarquons directement du graphique que le secteur de la sidérurgie et celui des services représentent à eux seuls les plus grosses contributions aux variations de l'effet technique.

Dans le détail le changement dans l'effet technique survenu entre 1996 et 2000 est expliqué à 61% par l'augmentation des émissions issues de l'effet technique de la sidérurgie. Passé l'an 2000, c'est l'amélioration technique du secteur des services qui représente 30% de la baisse de l'effet technique.

Les deux secteurs étudiés sont donc d'une importance capitale pour les politiques de lutte contre les changements climatiques, nous avons alors voulu entrer dans le détail du changement technique des deux secteurs étudiés ci-dessus. Nous pourrions décrypter ces variations et pointer du doigt les facteurs les plus sensibles.

La figure 4.8 et la Figure 4.9 présentent les variations internes des **intensités directes (F+G+H+I)** des deux secteurs.

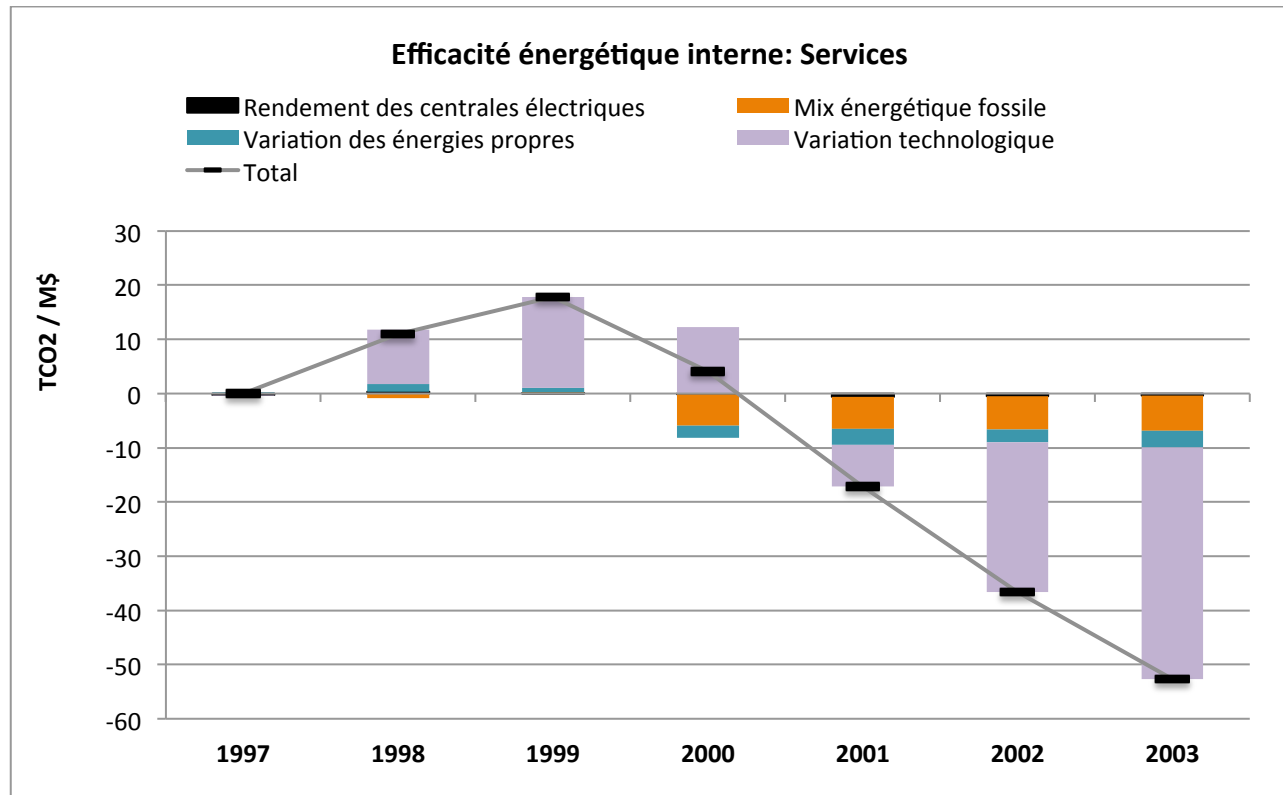
Figure 4.8 La variation de l'efficacité énergétique interne du secteur de la sidérurgie



Nous remarquons dans le cas de la sidérurgie une amélioration surtout technologique (G). L'utilisation de combustibles différents (H) est marginale sauf en 1998 avec une réduction de 20 tCO₂/M\$. Notons que l'utilisation des énergies propres (F) pousse à la baisse l'intensité d'émission du secteur au fil des années, en 2001 c'est une réduction de 30 tCO₂/M\$ comparée à une augmentation générale de l'effet technique interne (F+G+H+I) de 110 tCO₂/M\$. Pour le secteur de la sidérurgie, remarquons la grande importance de la technologie (G) qui subit une

forte variation à la hausse. Enfin la réduction des émissions due à l'amélioration du rendement des centrales (I) reste marginale et donc invisible sur le graphique.

Figure 4.9 La variation de l'efficacité énergétique interne du secteur des services



Concernant le secteur des services, les conclusions sont quelque peu différentes. Après avoir subi une forte hausse d'intensité (F+G+H+I) jusqu'en 1999, l'intensité du secteur baisse jusqu'en 2003. Le changement technologique (G) est responsable pour la plus grande partie de cette baisse (45% en 2001, 71% en 2002, 83% en 2003), mais il faut aussi noter qu'un changement du mix énergétique (H) à partir de l'an 2000 est responsable d'une importante partie de la baisse constatée. Enfin, l'utilisation d'énergie renouvelable (F) joue un rôle non négligeable dans la balance. Constatons alors que le secteur des services, dont la consommation énergétique provient essentiellement des bâtiments, a la possibilité d'être amélioré par le biais du mix énergétique, ou la substitution des énergies fossiles par des énergies propres.

Enfin de façon globale notons que :

- La valeur du rendement des centrales (I) est marginale, ce qui semble logique sur une période

de temps courte.

- L'apport de nouvelles sources d'énergies renouvelables (F) a permis de réduire les émissions incorporées aux exportations vers la Chine de 27 KtCO₂ entre 1996 et 2003
- 16 KtCO₂ ont été réduites par la substitution d'énergies fossiles (H).

4.3 Conclusion

Dans le chapitre 4, nous avons décomposé les émissions incorporées au commerce en trois effets : 1) L'effet d'échelle, 2) l'effet de composition, 3) l'effet technique.

Table 4.5 Résumé des principales mesures du chapitre 4.

1996 à 2003 (KtCO ₂)	FRANCE	CHINE
Variation du CO ₂ incorporé aux exportations bilatérales	+358	+4 658
Effet d'échelle	+533	+12 646
Effet de composition (output-mix)	+16	-220
... dont textiles (méthode expérimentale)	-2	+948
... dont agroalimentaire (expérimental)	0	+807
... dont mat. informatique (expérimental)	+2	-420
... dont produits chimiques (expérimental)	-19	-850
... dont sidérurgie (expérimental)	+33	+100
Effet technique	-191	-7 768
... dont changement de combustible	-16	+679
... dont changement technologique	- 128	-8175
... .. dont changement Interne	-42	-2856
... .. exemple sidérurgie	-5	-53
... .. exemple chimie	-17	-971
... .. dont externalités technologiques	-86	-5319
... .. exemple sidérurgie	-7	-1738
... .. exemple chimie	-3	-1697
... .. exemple services	-45	-255
... dont ajout d'énergies propres	- 27	na
... dont rendement des centrales	-7	na
... dont var. strc production	-13	-272
... .. dont autoconsommation	-13	+42

... .. dont variations CI	0	-314
... .. exemple variations CI micro-informatique	+1	-303
... .. exemple variation de consommation sidérurgie	0	-219
... .. exemple variation de CI textiles	0	+108
... .. exemple variation de consommation chimie	0	+116

Les principaux résultats montrent que dans le cas et de la Chine et de la France l'effet d'échelle joue le rôle le plus important dans la variation des émissions incorporées au commerce. Cet effet est moyennement contrecarré par l'effet technique qui pousse à la baisse les émissions incorporées au commerce. Enfin, l'effet de composition national est marginal par rapport aux deux autres, mais la mesure expérimentale des variations sectorielles reste importante.

En outre, l'analyse montre que la *structure économique et environnementale* des deux pays est radicalement différente. D'un côté, la Chine est un pays en cours d'industrialisation où l'industrie chimique et sidérurgique jouent un rôle capital dans l'économie. Ces deux industries, très intensives en pollution, incorporent du CO₂ dans toute l'économie et dans les échanges. De fait, une amélioration d'efficacité ciblée sur ces secteurs influence positivement sur tous les autres, mais aussi la quantité d'émission de CO₂ incorporée dans le commerce, cela même si la Chine n'exporte peu ou pas de produits issus de ces secteurs.

De l'autre côté, la France se révèle être un pays à l'économie post-industrielle, dans laquelle le secteur des services est central. Par conséquent, les émissions du pays et celles incorporées dans les échanges internationaux sont grandement affectées par les variations des émissions du secteur des services. Aussi, la grande majorité des secteurs économiques français étant peu intensifs en pollution, il s'avère que la production industrielle lourde, comme la sidérurgie, a un impact relativement plus grand sur l'émission incorporée à la demande finale du pays.

Nous notons aussi au cours de l'analyse que des points pourraient être approfondis par de la recherche supplémentaire. C'est le cas de l'effet de composition, dont le fonctionnement sectoriel a dû être mesuré avec une méthodologie expérimentale qui mériterait d'être développée plus en profondeur, notamment pour être intégrée à la LMDI. Notons également que l'analyse du mix énergétique pourrait aussi faire l'objet d'une analyse expérimentale afin de faire apparaître l'impact des différentes substitutions entre combustibles.

5 Les conséquences du commerce France-Chine

Le libre-échange ne pourra pas améliorer le bien-être si les coûts environnementaux ne sont pas internalisés; Les politiques commerciales peuvent être utilisées comme des substituts aux politiques environnementales; et alors un engagement envers le libre-échange peut fausser la politique environnementale.

Copeland et Taylor (2004)

5.1 Les conséquences du commerce France-Chine

Les conséquences du commerce est une partie synthétique, qui reprendra les principaux résultats des parties précédentes pour effectuer un bilan global de la relation entre commerce France-Chine et CO₂. Nous commençons par une présentation globale des conséquences du commerce avec une balance des émissions créées/réduites (**section 5.1.1**). Nous expliquons ensuite le détail de la création/réduction de CO₂ (**section 5.1.2**), puis présentons une situation globale sectorielle (**section 5.1.3**). Enfin, grâce à une analyse de décomposition structurelle nous calculerons la responsabilité de chaque secteur dans les changements perçus d'une année sur l'autre (**section 5.1.4**).

5.1.1 Balance des émissions créées/réduites.

Comme nous l'avons conclu du chapitre 3, le commerce France-Chine ne prend pas en compte le volet environnement. Les exportations françaises sont concentrées sur des secteurs dans lesquels l'efficacité relative de la France n'est pas la plus élevée. Et les importations françaises sont relativement abondantes dans des secteurs où la France ferait mieux d'exporter. Au final, combien de tonnes de CO₂ ont été produites à cause du manque de considération environnementale ?

Dans cette section, nous analysons le volume des émissions incorporées au commerce bilatéral dans son ensemble, et nous distinguons les émissions réelles, des émissions d'une situation *fictive* où le commerce la France-Chine n'existerait pas. La France (respectivement, la Chine) produirait sur son territoire ce qu'elle importe actuellement de Chine (respectivement, de France) :

$$S = E^f X^f + E^c X^c \quad (1)$$

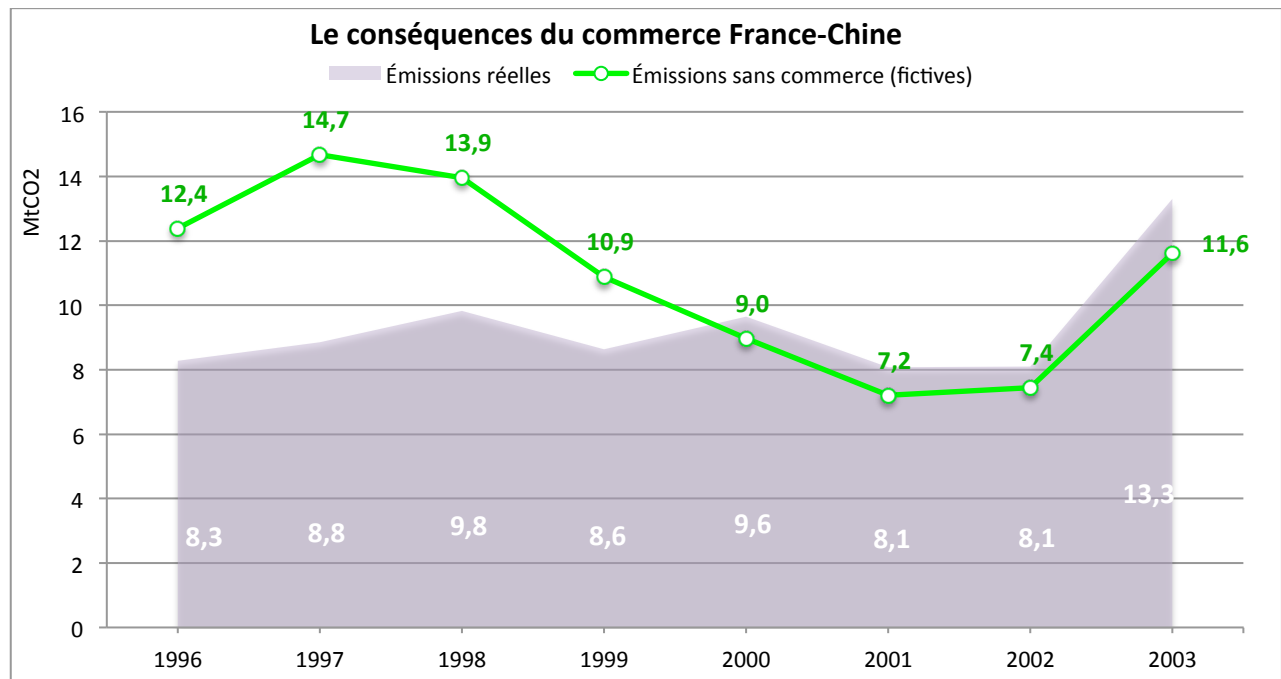
S est le volume réel des émissions incorporées au commerce bilatéral France-Chine; E^f (respectivement, E^c) est l'intensité totale d'émission de CO₂ françaises (respectivement, chinoise); X^f (respectivement, X^c) représente les exportations françaises vers la Chine (respectivement, chinoises vers la France)

$$S' = E^f X^c + E^c X^f \quad (2)$$

S' est le **volume fictif** des émissions nationales supplémentaires, considérant une situation sans commerce bilatéral entre la France et la Chine;

Les équations (1) et (2) sont représentées sur la figure 5.1. pour l'ensemble des années d'études et nous représentons ainsi une balance entre les émissions réelles et les émissions estimées d'une situation sans commerce. Enfin, c'est la différence entre ces deux observations qui nous donne la valeur de la **balance des émissions créées/réduites**

Figure 5.1 Les émissions avec commerce (réelles), et émissions sans commerce (fictives).



Nous apportons grâce à cette analyse une information nouvelle : La différence entre les émissions sans commerce (courbe verte sur le graphique) et les émissions réelles (zone mauve sur le graphique), est une forme de représentation de l'impact du commerce sur l'environnement :

- $S < S'$. Le commerce serait alors bénéfique pour l'environnement, c'est ce que l'on observe entre 1996 et 1999. Le commerce entre la France et la Chine a permis de réduire de 4,1 MtCO₂ l'émission planétaire en 1996, cette réduction d'émission augmente à 5,9 MtCO₂ en 1997, puis diminue jusqu'à l'année 2000 où elle devient négative.
- $S > S'$ Le commerce aurait alors un impact négatif sur l'environnement. À partir de l'année

2000, la tendance s'inverse, et le commerce entre la France et la Chine devient responsable d'une création de CO₂. Par rapport à une situation fictive sans commerce, en 2000 le commerce crée 0,600 MtCO₂, 900 KtCO₂ en 2001, 700 KtCO₂ en 2002, et la création d'émission augmente à 1,7 MtCO₂ en 2003.

5.1.2 Création contre réduction des émissions sectorielles

Peut-on mieux décrire le phénomène présenté dans la partie précédente ? Pour cela nous allons entrer dans le détail des secteurs afin de comprendre comment le commerce créait des émissions de CO₂, et pourquoi il peut aussi les réduire.

Nous reprenons l'équation (1), les émissions réelles, que nous détaillons par secteurs :

$$S_i = X_i^f E_i^f + X_i^c E_i^c + [X_i^f E_i^c - X_i^f E_i^c] + [X_i^c E_i^f - X_i^c E_i^f] \quad (3)$$

$$S_i = \underbrace{X_i^c (E_i^c - E_i^f)}_{\substack{\text{Émissions créées} \\ \text{par la Chine}}} + \underbrace{X_i^c E_i^f}_{\substack{\text{Émissions évitées} \\ \text{par la France}}} + \underbrace{X_i^f (E_i^f - E_i^c)}_{\substack{\text{Émissions réduites} \\ \text{par la France}}} + \underbrace{X_i^f E_i^c}_{\substack{\text{Émissions évitées} \\ \text{par la Chine}}} \quad (4)$$

Émissions incorporées aux exportations chinoises
Émissions incorporées aux exportations françaises

Dans l'équation (4) nous décomposons les émissions globales en 4 termes :

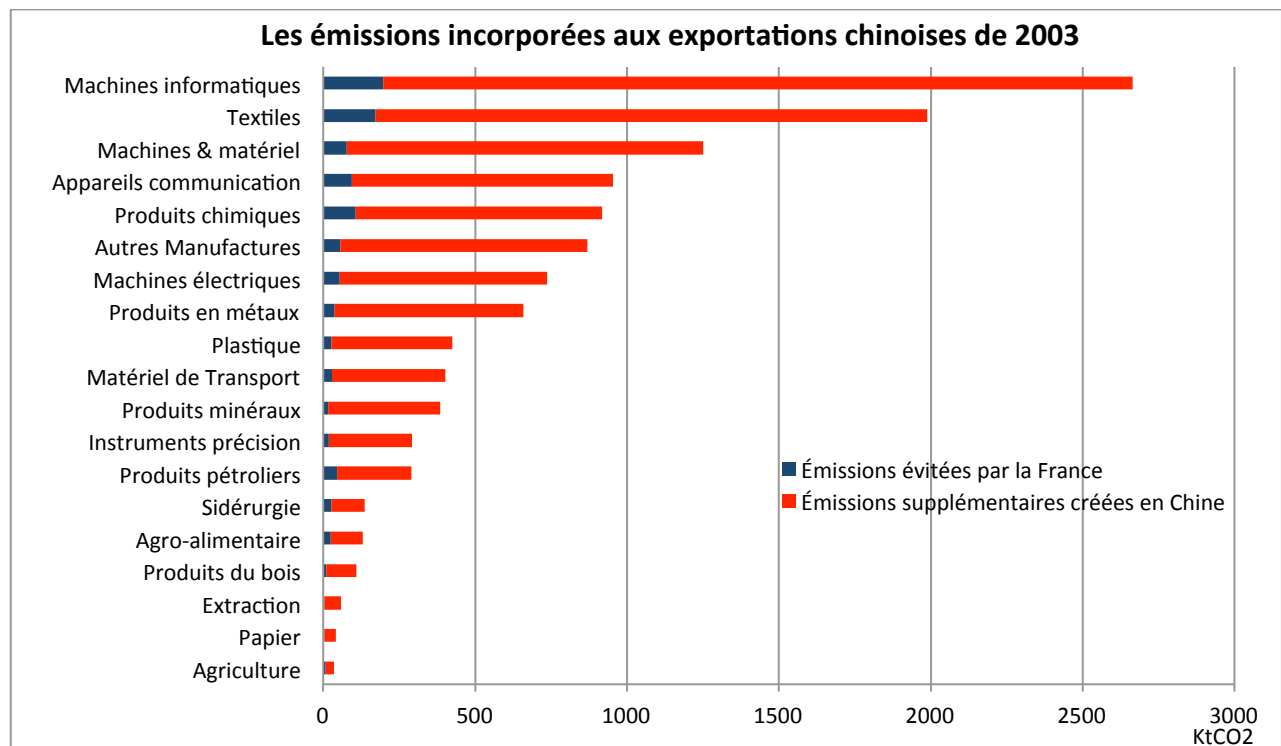
- **Les émissions créées par la Chine.** Si le commerce entre la France et la Chine n'existait pas et que la France produisait X^c sur son territoire, l'émission de CO₂ serait moins élevée qu'en réalité dû au fait que les industries françaises sont plus propres que les industries chinoises. La différence entre le cas sans commerce et le cas avec sont alors les émissions créées et comme l'intensité chinoise est toujours supérieure à l'intensité française, ce terme est toujours positif et représente **le surplus** d'émission de CO₂ entraîné par la consommation française, de biens qui ont été produits en Chine (des biens comparativement plus polluants que s'ils avaient été conçus en France).
- **Les émissions évitées par la France** représentent la quantité de CO₂ que la France aurait émis si elle avait produit les exportations chinoises sur son territoire.
- **Les émissions réduites par la France.** Dans une situation sans commerce entre la France et la

Chine et considérant que la Chine produise X^f sur son territoire, l'émission de CO₂ serait plus élevée qu'en réalité dû au fait que les industries chinoises sont plus polluantes que les industries françaises. Du fait que l'intensité chinoise est toujours supérieure à l'intensité française, cette composante négative traduit une **réduction** de CO₂ chinois, possible grâce à l'importation de produits français (comparativement moins polluants que s'ils avaient été conçus en Chine).

- **Les émissions évitées par la Chine** représentent la quantité de CO₂ que la Chine aurait émis si elle avait produit les exportations françaises sur son territoire.

Notons que la somme des émissions créées par la Chine, avec les émissions évitées par la France, donne les émissions de CO₂ incorporées aux exportations chinoises. Nous les représentons sur la figure 5.2

Figure 5.2 Émissions chinoises incorporées aux exportations en France en 2003

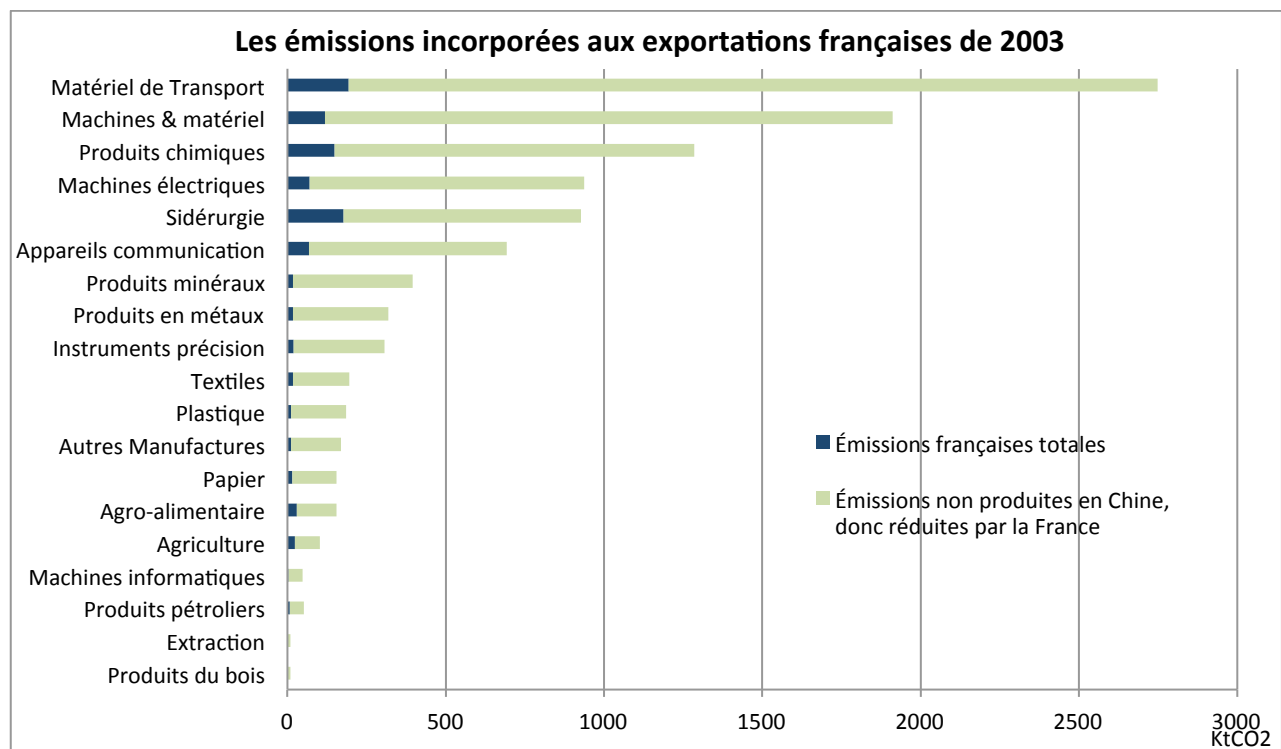


En 2003, le secteur des produits textiles et celui de l'informatique représentent 37% de la création de CO₂ incorporé aux exportations chinoises. Ces deux secteurs représentent à eux seuls 47% de

la valeur des exportations. À l'inverse, le secteur des machines et matériel qui pour 8% des exportations totalise 10% de la création d'émission. Globalement en 2003 la Chine a incorporé 12,3 MtCO₂ dans ses exportations vers la France, nous en comptabilisons 11,3 MtCO₂ qui ont été créées à cause de la différence entre l'intensité française et l'intensité chinoise.

Sur la figure 5.3, nous avons représenté les émissions incorporées aux exportations françaises (bandes bleues), ainsi que la quantité de CO₂ non produite par la Chine, mais qui aurait pu l'être si la Chine avait conçu chez elle les exportations françaises (bandes vertes). Notons que l'ensemble de ces émissions (bandes bleues et vertes) sont évitées par la Chine.

Figure 5.3 Émissions françaises incorporées aux exportations en Chine en 2003.



Les mesures indiquent que ce sont les exportations françaises du secteur des transports qui permettent à la Chine d'éviter le plus de CO₂ avec 2,7 MtCO₂ évitées. Grâce à l'intensité française dans ce secteur, le CO₂ incorporé dans les exportations n'est que de 200 KtCO₂, soit une réduction de 2,5 MtCO₂. Viennent ensuite les exportations du secteur des machines qui permettent de réduire de 1,8 MtCO₂ émis en Chine. Globalement ces deux secteurs représentent

45% des 9,6 MtCO₂ réduits par les exportations de la France en 2003.

5.1.3 La situation sectorielle globale

La première partie a développé une vision d'ensemble de la création/réduction du CO₂ par le commerce bilatéral, nous avons expliqué le mécanisme sectoriel dans la seconde partie. Nous allons donc pouvoir étudier l'impact intertemporel de la composition du commerce sur la création/réduction d'émissions de CO₂.

La figure 5.4 et la figure 5.5 sont une compilation des résultats précédents pour le commerce France-Chine où nous avons représenté trois éléments :

Les émissions de base (c'est le cas où seule la France exporterait en Chine) :

$$\text{Bandes bleues} = X_i^c E_i^f + X_i^f E_i^f \quad (5)$$

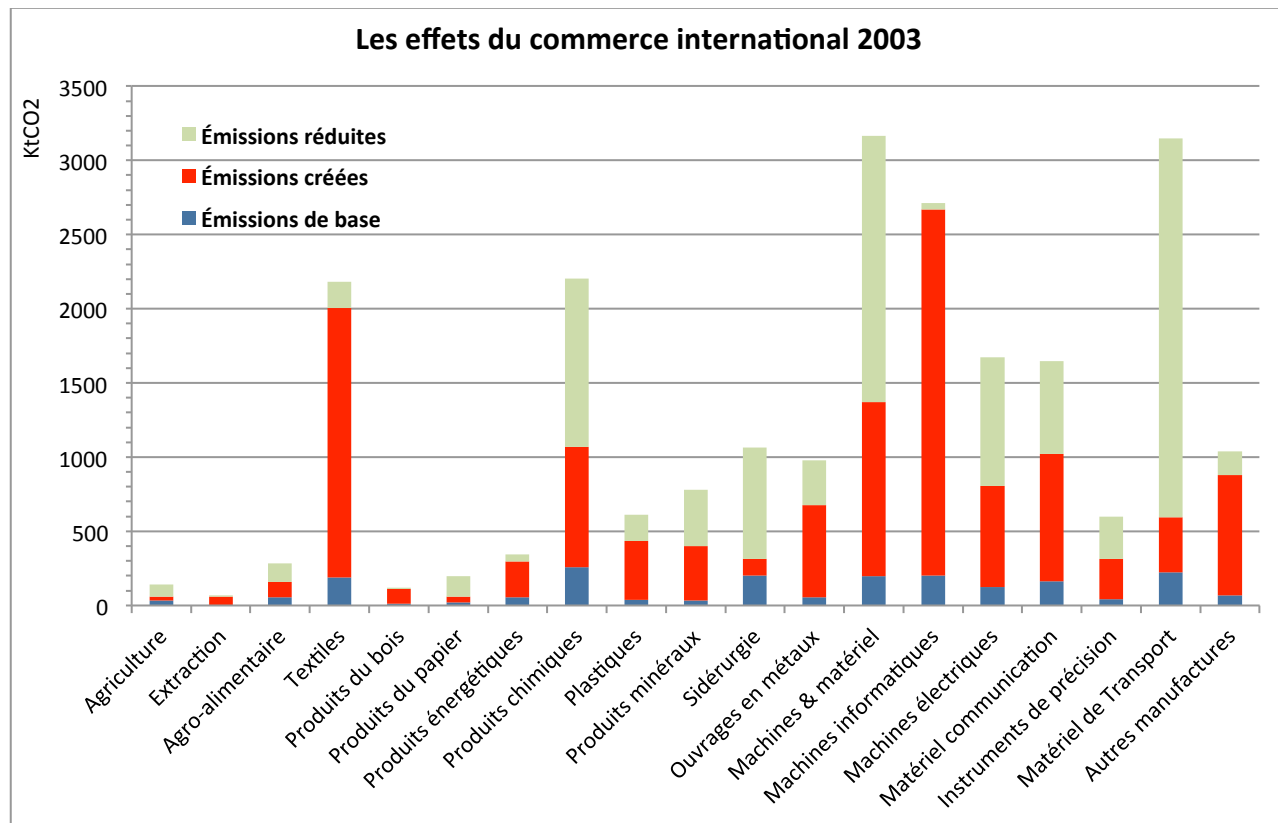
La création de CO₂ chinoise (si l'on ajoute ces émissions, aux émissions de base, nous obtenons les émissions réelles) :

$$\text{Bandes rouges} = X_i^c (E_i^c - E_i^f) \quad (6)$$

Enfin, la réduction de CO₂ française (ajoutée aux deux éléments précédents, nous obtenons la pire situation possible, celle où seule la Chine exporte) :

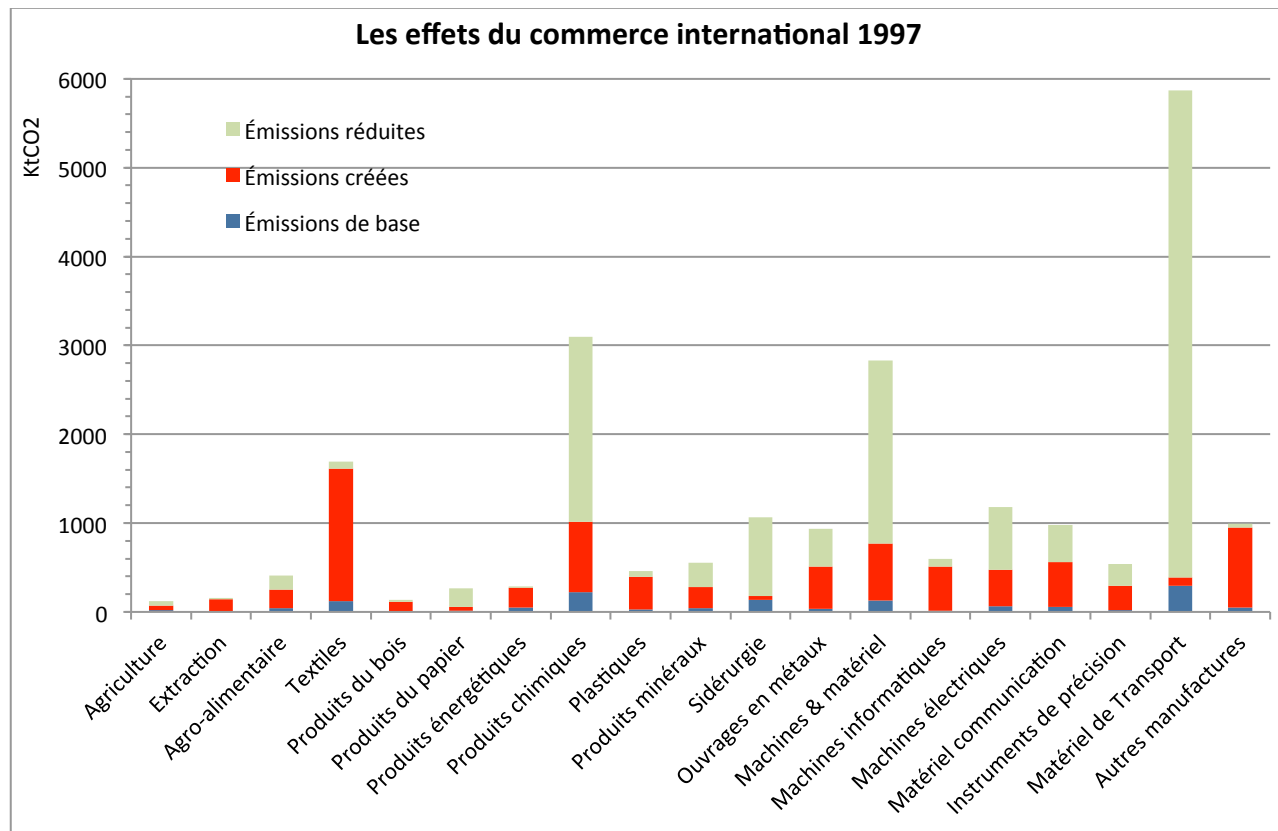
$$\text{Bandes vertes} = X_i^f (E_i^f - E_i^c) \quad (7)$$

Figure 5.4 Les effets du commerce international en 2003



Sur la figure 5.4, remarquons que le secteur du matériel de transport réalise la plus importante réduction de CO₂ avec 2,6 MtCO₂ sauvées. Il est suivi du secteur des machines et matériel (1,8 MtCO₂), et des produits chimiques (1,1 MtCO₂). À l'inverse le secteur des machines informatiques a créé 2,5 MtCO₂ et le secteur des textiles 1,8 MtCO₂.

Figure 5.5 Les effets du commerce international en 1997.



En 1997 la situation est différente. Les exportations du secteur du matériel informatique sont presque inexistantes, le secteur ne créait que 0,5 MtCO₂. Seul le secteur des textiles reste un gros créateur de CO₂ avec 1,5 MtCO₂. Cependant, les exportations de matériel de transport français contrebalancent l'ensemble de la création de CO₂ chinoise, avec une réduction de 5,4 MtCO₂.

En 2003, les émissions incorporées au commerce bilatéral atteignent 13,3 MtCO₂, dont 11,3Mt ont été créées par le commerce. En effet, la situation idéale serait que seule la France exporte en Chine, dans ce cas les émissions tomberaient à 2 MtCO₂. Le pire scénario, celui d'exportations uniquement chinoises ferait monter le total des émissions à 22,9 MtCO₂, soit 9,6 MtCO₂ de plus que la situation réellement observée. Au final, on peut considérer le commerce comme responsable de plus de création de CO₂, qu'il n'est responsable de réduction de CO₂ (+1,7 MtCO₂). En 1997, alors que les émissions atteignent 8,8 MtCO₂, la situation idéale est estimée à 1,4 MtCO₂, le pire scénario à 22,2 MtCO₂. Nous pouvons alors considérer que le commerce a créé 7,4 MtCO₂ pour en réduire 13,3.

Notons alors qu'entre 1997 et 2003, le secteur du matériel informatique chinois, et le secteur des textiles chinois ont grandement contribué à la création des émissions de CO₂. Bien que l'intensité d'émissions de CO₂ de ces deux secteurs se soit grandement améliorée, leurs exportations ont explosé. Dans le même esprit, notons que la chute des émissions réduites par le secteur du matériel de transport français contribue à la dégradation de la balance des émissions créées/réduites. En effet, les exportations du secteur se sont largement réduites, et la technologie³⁰ française a fait moins de progrès que celle chinoise.

Globalement la figure 5.4 et la figure 5.5 rappellent le résultat du graphique 5.1 pour l'année 2003 et 1997. **C'est à dire, un bilan de 1,7 MtCO₂ créé par le commerce à l'année 2003, mais une situation de réduction de 5,9 MtCO₂ à l'année 1997.** Cette dégradation de la balance des émissions créées/réduites provient essentiellement des variations de la balance commerciale et de la technologie des secteurs **du textile, du matériel informatique, et du matériel de transport**. Dans la section suivante, nous calculerons en détail la part de contribution de chaque secteur, cette section terminera la partie d'analyse du mémoire.

5.1.4 Décomposition des émissions créées/réduites

Peut-on mesurer la responsabilité de chaque secteur dans la dégradation de la balance des émissions créées/réduites ? Pour ce faire, nous allons décomposer les équations précédemment utilisées afin de calculer précisément la part de responsabilité de chaque secteur.

La somme des émissions créées et réduites (équations 6 et 7) peut être réécrite comme une différence de balance commerciale, facteur d'une différence d'intensité :

$$C_i = X_i^f (E_i^f - E_i^c) + X_i^c (E_i^c - E_i^f) = (X_i^f - X_i^c)(E_i^f - E_i^c) \quad (8)$$

C_i est le bilan de la création/réduction des émissions de CO₂ par le commerce.

³⁰ Progrès dans l'efficacité énergétique

S'inspirant de la méthodologie de décomposition LMDI dans Ang (2005), lorsque $C_i^t > 0$ et $C_i^{t+1} > 0$, nous pouvons écrire que :

$$\Delta(E_i^f - E_i^c) = \frac{C_i^{t+1} - C_i^t}{\ln C_i^{t+1} - \ln C_i^t} \ln \left(\frac{\{E_i^f - E_i^c\}_{t+1}}{\{E_i^f - E_i^c\}_t} \right) \quad (9)$$

$$\Delta(X_i^f - X_i^c) = \frac{C_i^{t+1} - C_i^t}{\ln C_i^{t+1} - \ln C_i^t} \ln \left(\frac{\{X_i^f - X_i^c\}_{t+1}}{\{X_i^f - X_i^c\}_t} \right) \quad (10)$$

Lorsque $C_i^t < 0$ et $C_i^{t+1} < 0$, et suivant les résultats de Ang et Liu (2007b) nous pouvons écrire que :

$$\Delta(E_i^f - E_i^c) = -\frac{C_i^t - C_i^{t+1}}{\ln(-C_i^{t+1}) - \ln(-C_i^t)} \ln \left(\frac{\{E_i^f - E_i^c\}_{t+1}}{\{E_i^f - E_i^c\}_t} \right) \quad (11)$$

$$\Delta(X_i^f - X_i^c) = -\frac{C_i^t - C_i^{t+1}}{\ln(-C_i^{t+1}) - \ln(-C_i^t)} \ln \left(\frac{\{X_i^f - X_i^c\}_{t+1}}{\{X_i^f - X_i^c\}_t} \right) \quad (12)$$

Lorsque $C_i^t > 0$ et $C_i^{t+1} < 0$, nous nous inspirons de la méthodologie d'Ang et Liu (2007a, 2007b) pour résoudre le problème des logarithmes négatifs et du passage par des valeurs égales à zéro (Preuve des équations en annexe 5.1) :

$$\Delta(E_i^f - E_i^c) = \lim_{C_i^0 \rightarrow 0^+} \left(\frac{C_i^0 - C_i^t}{\ln(C_i^0) - \ln(C_i^t)} \ln \left(\frac{-\sqrt{C_i^0}}{(E_i^f - E_i^c)^t} \right) \right) - \lim_{C_i^0 \rightarrow 0^+} \frac{(-C_i^{t+1}) - C_i^0}{\ln(-C_i^{t+1}) - \ln(C_i^0)} \ln \left(\frac{(E_i^f - E_i^c)^{t+1}}{-\sqrt{C_i^0}} \right) \quad (13)$$

$$\Delta(X_i^f - X_i^c) = \lim_{C_i^0 \rightarrow 0^+} \frac{C_i^0 - C_i^t}{\ln(C_i^0) - \ln(C_i^t)} \ln \left(\frac{-\sqrt{C_i^0}}{(X_i^f - X_i^c)^t} \right) - \lim_{C_i^0 \rightarrow 0^+} \frac{(-C_i^{t+1}) - C_i^0}{\ln(-C_i^{t+1}) - \ln(C_i^0)} \ln \left(\frac{-(X_i^f - X_i^c)^{t+1}}{-\sqrt{C_i^0}} \right) \quad (14)$$

Les résultats de ces décompositions sont listés dans le tableau 5.1

Table 5.1 décomposition des variations dans la création d'émission sur les années 1997-2003

Secteur (KtCO ₂)	Balance Création (+) réduction (-) 1997	Changement dans la balance commerciale	Changement dans la différence d'intensité	Balance Création (+) réduction (-) 2003
Agriculture	11	-31	-31	-52
Extraction	115	-19	-50	46
Agro-alimentaire	48	-34	-34	-20
Textiles	1415	1026	-803	1638
Produits du bois	86	72	-68	90
Produits du papier	-172	-14	83	-103
Produits énergétiques	212	104	-116	200
Produits chimiques	-1291	378	589	-324
Plastiques	305	41	-123	223
Produits minéraux	-35	22	3	-10
Sidérurgie	-842	-336	539	-639
Ouvrages en métaux	51	357	-86	321
Machines & matériel	-1415	205	590	-620
Machines informat.	409	3146	-1133	2422
Machines électriques	-300	-51	165	-187
Matériel com.	85	272	-120	236
Instruments précision	24	-19	-19	-14
Matériel de Transport	-5394	1023	2190	-2181
Autres manufactures	861	301	-506	656
TOTAL	-5826	6440	1071	1684

Les résultats du tableau 5.1 sont des plus intéressants. Ils permettent de chiffrer la création/réduction d'émission de CO₂ résultant des changements dans la balance commerciale française. L'excédent la balance commerciale française diminuant au fil des années d'étude nous pouvons désormais chiffrer son impact sur les émissions de CO₂.

Dans le détail des secteurs aux volumes de CO₂ créé les plus importants, notons :

- La création de CO₂ du secteur du matériel informatique va au cours de la période d'étude être augmentée de 2 MtCO₂. Le déficit français qui passe de 130M\$ en 1997 à 2,1G\$ en 2003, est responsable de 156% de ce changement, soit l'augmentation de la création de CO₂ de 3,1 Mt.

- La variation du secteur des textiles. La balance commerciale française passe d'un déficit de 600 M\$ à 1,2 G\$ entre 1997 et 2003. Cela provoque une augmentation des émissions créées de 1 MtCO₂, soit 461% du changement.
- La variation du secteur des transports dont la variation de la balance commerciale française, qui passe d'un excédent de 1,6G\$ à 1,2G\$ entre 1997 et 2003, provoque une augmentation de 1 MtCO₂ des émissions créées (32% du changement total).

Sur l'augmentation des émissions créées par le commerce de 7,6 MtCO₂ entre 1997 et 2003, l'augmentation du déficit commercial du secteur du matériel informatique compte pour 42% de la variation (bien que la réduction de l'intensité chinoise réduise la responsabilité totale du secteur informatique à 27%). Le secteur du matériel de transport est quant à lui responsable de 43% de la variation, et 13,7 points sont imputables à la baisse des exportations de matériel de transport français.

Que nous apprend l'ensemble de cette partie ? D'un point de vue global, la balance des émissions créées/réduites représente une méthode originale et intuitive pour estimer les dégâts du commerce international. La création de CO₂ par l'intermédiaire des importations est un sujet qui a été rarement appuyé par la littérature, mais qui n'en reste pas moins important compte tenu de l'explosion des échanges internationaux entre pays développés et PED.

D'un point de vue sectoriel, cette analyse révèle un résultat inédit puisqu'elle révèle année par année le bilan de chaque secteur. Par exemple, les secteurs du textile, du matériel de transport, et des produits informatiques sont passés inaperçus dans les parties précédentes, mais ils se révèlent dangereux dans cette analyse. Nous apprenons que le déficit français en matériel informatique provenant de Chine est responsable de la création de 3,2 MtCO₂ en 2003. Le secteur des transports dont l'excédent de la balance commerciale recule est lui responsable de la création de 1MtCO₂ en 2003.

Au final, cette analyse complète permet de mettre en évidence et de chiffrer les principaux problèmes existants dans la relation commerciale France-Chine. Nous avons vu qu'entre 1996 et 2003 la balance des émissions créées/réduites s'est rapidement dégradée, provoquant une hausse

des émissions créées, or seule une poignée de secteurs en sont responsables. Un programme politique ambitieux ayant pour objectif de s'attaquer au CO₂ incorporé au commerce international, pourrait prendre en compte ces informations pour ajuster parfaitement les politiques de lutte contre les changements climatiques.

5.2 Solutions politiques

Le mode de fonctionnement actuel du protocole de Kyoto est-il efficace ? Nous avons montré tout au long de ce mémoire de maîtrise que des failles existent, en particulier au niveau du commerce international, qui va entraîner un phénomène de fuite de CO₂ et de passager clandestin aux régulations d'émission. En s'inspirant des différentes méthodes rencontrées dans la littérature existante, nous discuterons des solutions possibles pour encadrer les fuites et la création de CO₂.

Comme présenté dans Munksgaard et Pedersen (2001) nous commencerons par discuter de l'hypothèse du basculement de la responsabilité producteur à la responsabilité consommateur (section 5.2.1). Dans la section 5.2.2 nous nous pencherons sur la décomposition de responsabilité proposée par Lenzen *et al* (2007). Enfin, grâce à l'ensemble des informations développées au cours de ce mémoire nous discuterons du meilleur scénario de taxation possible pour limiter les fuites et la création de CO₂ (section 5.2.3).

5.2.1 Basculement de la responsabilité producteur au consommateur.

En s'inspirant de l'étude de Munksgaard (2001) nous voulons observer une situation où la responsabilité dans l'émission de CO₂ d'un pays ne serait plus imputée aux émetteurs de CO₂, mais aux consommateurs de CO₂. Les équations suivantes représentent les deux cas de figure

$$\text{Producteur} = CO_2; \quad \text{Consommateur} = CO_2 + S^M - S^X$$

CO₂ est l'émission de CO₂ nationale; S^M est le CO₂ incorporé aux importations; S^X est le CO₂ incorporé aux exportations.

Dans le cas restreint du commerce de la France avec la Chine, nous avons regroupé au sein du tableau 5.2 les émissions produites par la France, et les émissions consommées par la France,

prenant pour hypothèse que la Chine est seul partenaire commercial de la France.

Table 5.2 Responsabilité producteur versus consommateur.

FRANCE / KtCO ₂	A- Responsabilité Producteur	BEET France	B- Responsabilité Consommateur	Rapport B/A
1996	408 126	-7 093	415 219	101,7%
1997	379 487	-7 135	386 622	101,9%
1998	409 094	-8 033	417 127	102,0%
1999	371 309	-6 843	378 152	101,8%
2000	365 560	-8 064	373 624	102,2%
2001	385 827	-6 695	392 522	101,7%
2002	380 448	-6 717	387 165	101,8%
2003	387 147	-11 394	398 541	102,9%

Les résultats montrent qu'en 2003, rien qu'avec le commerce entre la France et la Chine, la responsabilité d'émission de CO₂ française pourrait augmenter de 11 millions de tonnes de CO₂ avec un basculement de la responsabilité du producteur au consommateur. Cela représente une amplitude de 2,9% de la production totale de CO₂ française.

Cette solution simple vise un objectif fondamental : contraindre le consommateur à sélectionner les industries et les produits d'importation en fonction de leur bilan environnemental. En préférant les produits au contenu carbone faible, soit des produits locaux (réduction des émissions du transport), ou des produits conçus dans des pays à l'empreinte environnementale faible, le consommateur serait récompensé, dans le cas contraire il serait pénalisé. La sélection du consommateur pousserait en théorie les industriels à réduire leur empreinte carbone pour acquérir plus de parts de marché.

Cette solution a été avancée par la littérature existante, elle permettrait en outre de réduire les fuites de CO₂ dans les pays industrialisés. En effet, une responsabilisation au consommateur qui prendrait en compte le CO₂ incorporé dans le commerce international, permettrait de réduire les importations depuis les pays à l'empreinte carbone élevée, et en particulier depuis les secteurs à l'empreinte carbone élevée.

Enfin, si l'hypothèse du Havre de pollution soulevée dans Frankel et Rose (2005) est vraie, l'industrie serait ainsi moins poussée à délocaliser à l'étranger sa production pour respecter un quota d'émission de CO₂. Premièrement, quel que soit l'emplacement industriel les firmes ne seraient plus contraintes par un quota identique d'émission, délocaliser pour profiter d'une régulation environnementale plus souple n'a donc plus de sens. Aussi, la production dans des pays développés étant plus propre, la possibilité de croissance des entreprises se verrait renforcée.

Cependant, en s'inspirant de Bastianoni *et al* (2004) nous pouvons soulever plusieurs critiques à ce scénario. La critique majeure vient du fait qu'il est difficile et coûteux de mesurer le cycle de vie de chaque produit de consommation, encore plus si l'on veut harmoniser un système international. Ce problème a des conséquences, si les consommateurs ne sont pas suffisamment bien informés du contenu carbone de leurs achats, la consommation responsable et la sélection naturelle des entreprises innovantes n'est plus possible.

De plus, ce scénario pourrait faire apparaître un nouveau type de passager clandestin. Avec une régulation plus faible pour les entreprises, mais plus forte pour les consommateurs, les monopoles et autres cartels pourraient passer outre le développement de l'efficacité énergétique, ou des réductions d'émission, en harmonisant par alliance leurs contenus carbone. Si les biens concernés sont faiblement substituables, la sélection par le consommateur des entreprises les plus vertes ne sera plus possible, et la réduction d'émission sera bloquée.

Enfin, ce scénario transfère la régulation gouvernementale des entreprises aux consommateurs. Au niveau national, les efforts de réduction de CO₂ par les entreprises dépendront donc de facteurs indirects difficilement contrôlables sur le court terme, nous pensons au niveau d'éducation environnementale, ou plus simplement à la contrainte financière ou légale imposée aux consommateurs.

5.2.2 La distribution de Lenzen *et al* (2007)

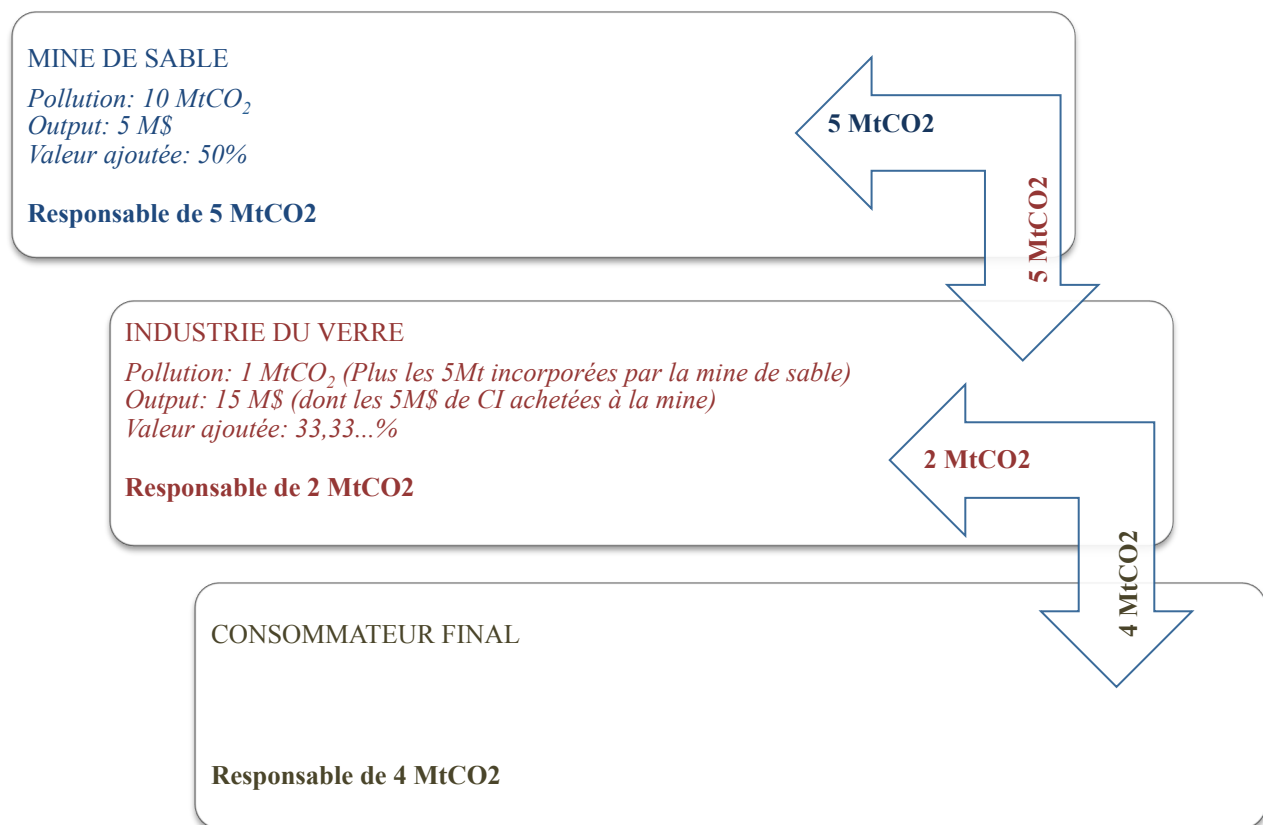
Comment conserver les avantages d'un basculement de la responsabilité producteur au consommateur, tout en réduisant les critiques du système? Lenzen *et al* (2007) développent un modèle de distribution de la responsabilité sur l'ensemble de la chaîne de production. Ainsi, et la

production, et la consommation de CO₂ seraient encadrées. La méthodologie de Lenzen et Al (2007) étant complexe, nous avons divisé cette partie en deux, i) le fonctionnement de la méthodologie, ii) les résultats dans le commerce France-Chine.

i- Fonctionnement du modèle et mise en application.

La distribution de la responsabilité d'émission suivant Lenzen *et al* (2007) consiste en un partage du CO₂ émis entre producteur et consommateur. Selon l'auteur, pour augmenter la consistance le partage se fait selon la valeur ajoutée de chaque produit. Comme présenté sur la figure 5.6, plus le producteur génère de valeur ajoutée, plus sa part de responsabilité est importante dans le partage.

Figure 5.6 Décomposition des responsabilités par Lenzen et al (2007)



Pour intégrer le modèle de distribution des responsabilités de Lenzen *et al* (2007) dans notre analyse, nous transformons le modèle de comptabilisation des émissions incorporées à la

production. Nous transférons le CO₂ de chaque CI entre producteur et acheteur de la CI. Rappelons l'équation (6) du chapitre 3 :

$$E = \Omega(Id - A^d)^{-1}$$

*E est un vecteur N*1 dont les éléments e_i sont les taux d'intensité totale d'émission de CO₂ des secteurs i; Ω est une matrice diagonale N*N dont les éléments ω_{ij} ($i=j$) sont les taux d'intensité directe d'émission de CO₂ des secteurs i, les éléments hors diagonale de la matrice sont quant à eux égaux à 0*

Dans la modélisation classique, le CO₂ transféré par le biais des CI est incorporé à la demande finale de chaque secteur, donc au consommateur de la CI. Nous transformons cette équation pour distribuer les émissions entre producteur et consommateur selon le ratio de la valeur ajoutée sur l'output de chaque secteur :

$$E^L = \Omega \times (V \times (Id - A^d)^{-1}) + \Omega \times (V' \times (Id - A^d)^{-1})$$

*E^L est un vecteur N*1 dont les éléments e_i^L sont les taux d'intensité totale d'émission de CO₂ des secteurs i calculés selon la méthodologie de Lenzen et al (2007); V est une matrice diagonale N*N dont chaque élément v_{ij} ($i=j$) est le ratio de la valeur ajoutée sur l'output du secteur i, les éléments hors diagonale de la matrice sont quant à eux égaux à 0. V' est une matrice diagonale N*N dont chaque élément v'_{ij} ($i=j$) est égal à $1 - v_{ij}$, les éléments hors diagonale de la matrice sont quant à eux égaux à 0.*

Notons que nous pouvons extraire la valeur ajoutée de chaque secteur du TES. La valeur ajoutée est égale à la production brute moins (-) les entrées intermédiaires utilisées par les industries. Les intensités totales de CO₂ sont alors transformées et nous pouvons remarquer que :

- Un secteur qui vend relativement plus de CO₂ qu'il n'en achète aux autres secteurs voit son intensité totale augmenter, en raison du fait qu'il sera considéré comme responsable d'une partie des émissions de CO₂ qu'il aura *vendu*³¹ aux autres secteurs.
- Un secteur générateur de valeur ajoutée voit son intensité totale augmenter, en raison du fait qu'il sera considéré comme responsable d'une plus grosse partie des émissions de CO₂ qu'il

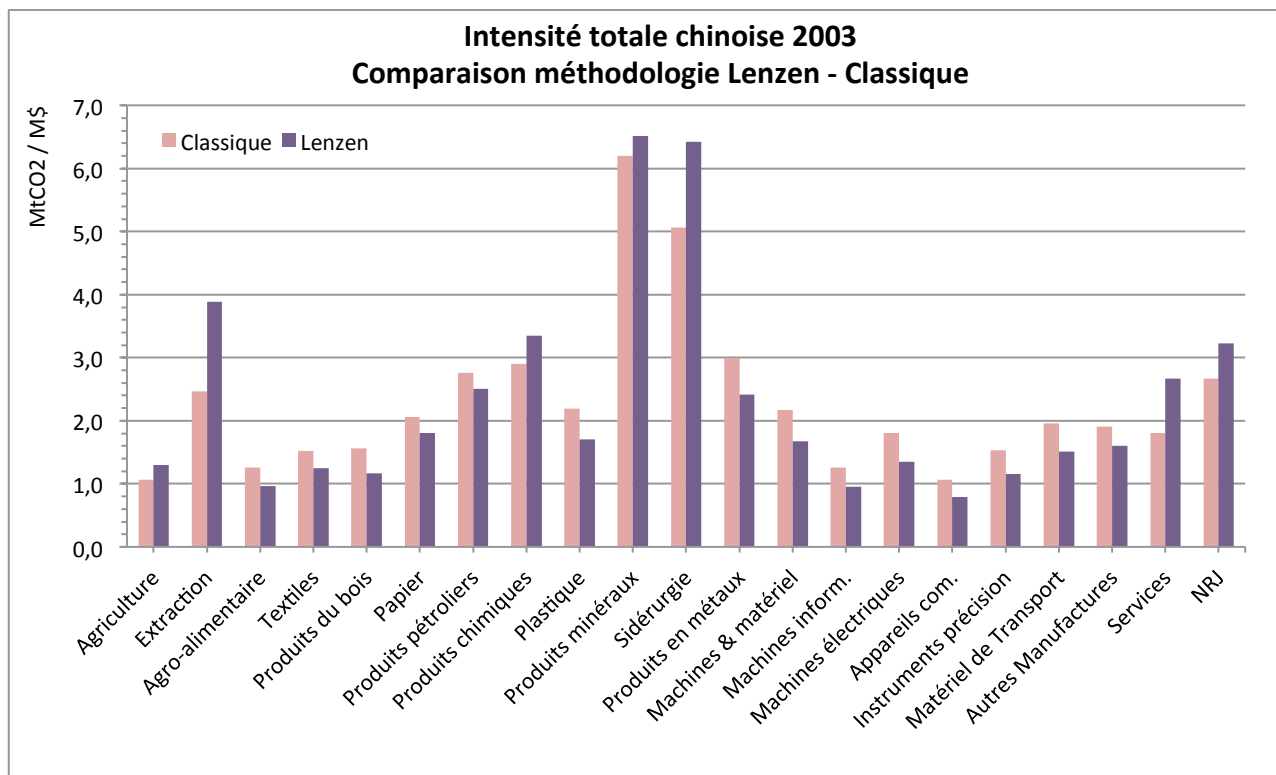
³¹ Les émissions sont "vendues" par le biais des consommations intermédiaires dans lesquelles elles sont incorporées

aura vendu aux autres secteurs.

ii- Résultats dans le cadre du commerce France-Chine

Pour nous rendre compte des transformations, nous comparons sur la figure 5.7, les intensités totales chinoises suivant une méthodologie classique, et suivant la distribution des responsabilités de Lenzen.

Figure 5.7 Comparatifs de la méthode de Lenzen et al (2007) et de la méthode classique sur le calcul de l'intensité chinoise en 2003.

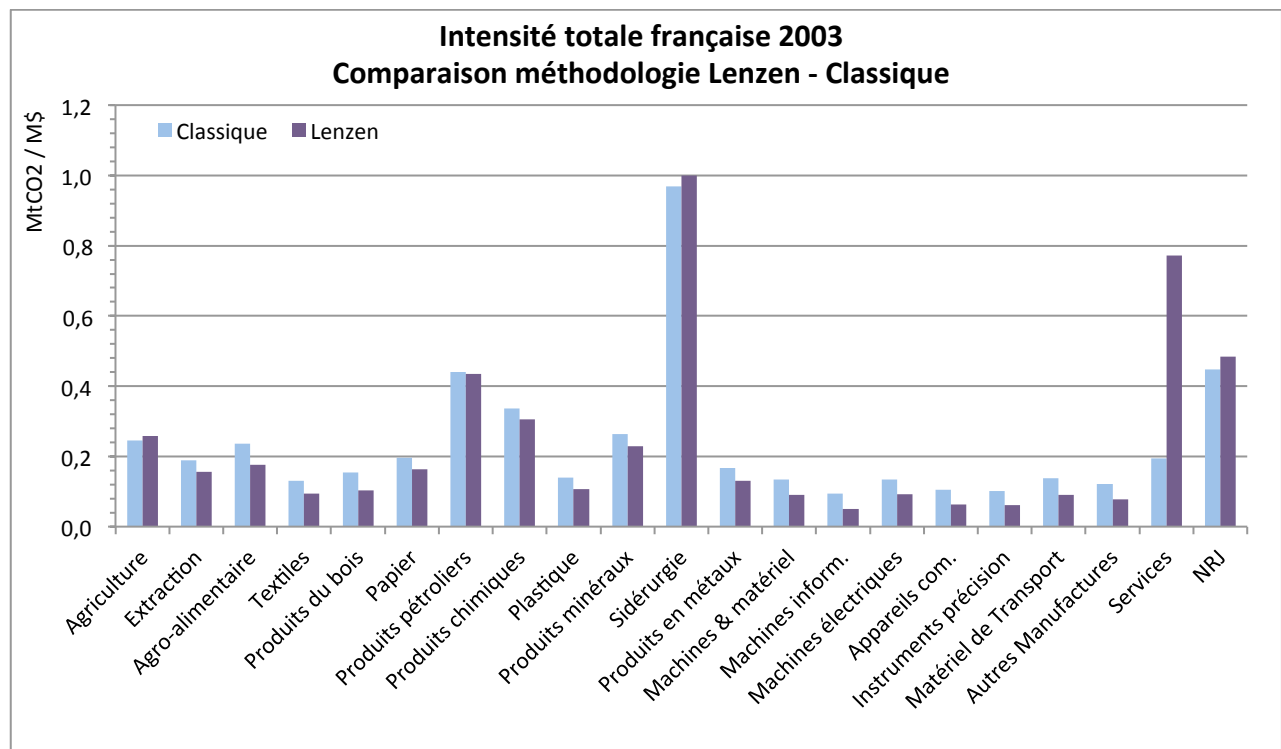


Nous avons vu précédemment que le secteur de la sidérurgie est gros fournisseur de carbone. Malgré un ratio de valeur ajoutée / output faible (21%), son intensité augmente de 27% du fait que le secteur distribue énormément d'émission de CO2 dans l'économie. Nos données indiquent en outre que le secteur de l'extraction des ressources est générateur d'un important ratio de valeur ajoutée / output (49%), son intensité d'émission de CO2 augmente alors de 57%. Au contraire, d'autres secteurs comme les appareils de communication, les machines électriques, les produits du bois voient leurs intensités baisser de 26%. En effet, ces secteurs sont de gros acheteurs de

CO₂, de faibles vendeurs de CO₂, et qui plus est leur valeur ajoutée est relativement faible (respectivement 22, 22 et 24%).

La figure 5.8 représente les intensités françaises suivant les deux méthodes de distribution des responsabilités.

Figure 5.8 Comparatifs de la méthode de Lenzen *et al* (2007) et de la méthode classique sur le calcul de l'intensité française en 2003.



Comme nous pouvions nous y attendre, le secteur des services voit sa responsabilité augmenter de 400%, en effet à cause d'un output très important le secteur est de loin le principal distributeur de CO₂ de l'économie (voir chapitre 4), en outre son ratio de valeur ajoutée / output est le plus élevé de l'économie française (59%). Le modèle de Lenzen *et al* va alors concentrer la responsabilité d'émission de CO₂ sur ce secteur particulier en réduisant celle de tous les autres.

Une première remarque étonnante est que le modèle de Lenzen *et al* (2007) ne lisse pas les intensités. Au contraire, les industries lourdes ont plus la responsabilité d'émission de CO₂ que dans le modèle classique, alors que les secteurs relativement moins polluants voient quant à eux

leurs intensités baisser. Nous pouvons expliquer ce principe, car avec la méthode de distribution de Lenzen (2007) les industries lourdes qui vendent de grosses quantités de CO₂ par l'intermédiaire des CI sont responsables d'une partie des ventes, alors que les secteurs les moins polluants vendent au contraire moins de CO₂ et voient alors leur responsabilité d'émission réduite. Grâce à de plus gros volumes de CO₂ comptabilisés, le principe de distribution de Lenzen *et al* (2007) met donc une pression environnementale plus importante sur les secteurs hautement polluants. En plus des avantages apportés par un partage des responsabilités discutés dans le chapitre 2, ce principe pourrait-il aussi permettre de concentrer les efforts de réduction d'intensité d'émission sur des secteurs primordiaux?

Enfin nous devons nous poser une dernière question primordiale. La distribution de Lenzen *et al* (2007) étouffe-t-elle la visibilité des fuites de CO₂ dans le commerce France-Chine ? Afin d'apporter un argument de réponse, nous avons procédé à une nouvelle compilation de la totalité de l'étude avec pour hypothèse une distribution des responsabilités suivant Lenzen *et al* (2007). Nous présentons sur le tableau 5.3 les résultats du calcul de la BEET.

Table 5.3 Responsabilité producteur versus consommateur.

FRANCE / KtCO ₂	BEET Lenzen France	BEET Classique France	Rapport BEET Lenzen / Classique	Responsabilité Lenzen
1996	-6 348	-7 093	89,5%	414 474
1997	-6 269	-7 135	87,9%	385 756
1998	-7 007	-8 033	87,2%	416 101
1999	-5 902	-6 843	86,3%	377 211
2000	-6 796	-8 064	84,3%	372 356
2001	-5 715	-6 695	85,4%	391 542
2002	-5 738	-6 717	85,4%	386 186
2003	-9 505	-11 394	83,4%	396 652

Nous pouvons remarquer que la méthodologie de Lenzen *et al* (2007) adoucit les fuites de CO₂, comptabilisées dans les parties précédentes. La raison est que les secteurs dont la responsabilité d'émission de CO₂ augmente d'une méthode à l'autre sont ceux qui n'exportent pas, ou très peu (sidérurgie, services, extraction). À l'inverse, les secteurs dont la responsabilité diminue sont les plus gros exportateurs qui d'une année sur l'autre exportent de plus en plus (matériel

informatique, textiles).

Notons toutefois que la différence entre les résultats de la BEET suivant Lenzen *et al* (2007) et ceux de la BEET originale est faible. Prenant pour hypothèse le basculement de la responsabilité producteur à la responsabilité consommateur, cette méthodologie de distribution des responsabilités permettrait de conserver en moyenne 86% de l'encadrement des fuites de CO₂. Ce qui semble encourageant à la vue des nombreux avantages discutés préalablement.

Nous pouvons donc conclure que le modèle de Lenzen *et al* (2007) permet avec élégance de concilier en partie les avantages de la responsabilisation du consommateur avec la correction des critiques concernant la suppression de la responsabilité au producteur.

5.2.3 La taxation du CO₂ incorporé au commerce

Considérant l'importance de la fuite de carbone existant actuellement dans le commerce, beaucoup de pays sont en train de discuter la possibilité d'une taxe carbone sur le CO₂ incorporé au commerce. Comment taxer les émissions incorporées au commerce ? Grâce à l'ensemble de l'analyse effectuée en amont nous souhaitons dans cette dernière partie départager plusieurs méthodes de taxation du CO₂ incorporé au commerce. En prenant en compte l'objectif principal de réduction des fuites de carbone dans le commerce international, nous souhaitons nous pencher sur le type d'émissions assujetties à une taxe (émissions directes ou indirectes?), l'origine des émissions à taxer (Émissions incorporées, ou fuites de la BEET?), et enfin réfléchir sur un mécanisme de flexibilité relié au protocole de Kyoto différent de celui en place aujourd'hui.

Lorsque les fuites d'émissions de CO₂ incorporées au commerce sont encadrées, les politiques doivent tenter de les réduire. Pour cela, une taxe carbone est un instrument à l'avantage double; la taxe a pour but d'inciter les entrepreneurs privés et publics à réduire leurs émissions pour réduire leurs coûts de production. Aussi, l'argent perçu via une taxe carbone permettrait de financer des projets d'adaptation³² ou de mitigation³³.

³² Financement de l'adaptation de l'Homme aux impacts qu'il a sur le climat.

³³ Financement de la réduction des impacts de l'Homme sur le climat

Ces taxes pourraient avoir différentes utilités, selon l'accord des politiques :

- Les recettes des taxes pourraient contribuer à financer le fond vert pour le climat³⁴
- Les recettes des taxes pourraient être redistribuées aux meilleures entreprises de chaque secteur, afin de créer un système de bonus/malus.
- Les recettes des taxes pourraient être investies dans la mitigation ou l'adaptation nationale.

Les principaux effets d'une taxe carbone généralisée à l'international sont bien connus. En plus de générer des revenus, la taxe devrait inciter les pays développés à réduire leurs importations depuis les PED, dont le coût des exportations augmentera en fonction du niveau de pollution. Ce système générera sans doute une baisse globale des émissions de CO₂ incorporées au commerce, et sûrement des émissions mondiales.

Cependant, les taxes carbone peuvent être critiquées. En effet, les exportations des PED seraient fortement pénalisées. Rappelons l'une des relations fondamentales entre commerce et environnement : les exportations sont un facteur de développement, et donc un moteur de croissance essentiel aux PED. Par le biais de l'effet technique, les exportations contribuent donc à réduire la pollution. La taxe carbone est alors un instrument à manier avec précaution, car son objectif de réduire les émissions de CO₂, pourrait facilement s'inverser ou freiner la lutte contre les changements climatiques.

Dans ce mémoire de maîtrise, nous ne discutons pas de la nécessité, ou de la non-nécessité, de mettre en place une taxe carbone. Ce récent débat est aussi complexe qu'intéressant, et mériterait une analyse à part entière. Dans notre étude, nous souhaitons simplement utiliser nos résultats afin de nous concentrer sur les paramètres de conception d'une taxe carbone. Aussi, nous pourrions répondre à cette simple question : **dans le cadre d'un nouveau protocole international, où les fuites d'émission de CO₂ seraient encadrées par une taxe carbone, quelles seraient les meilleures options pour le commerce entre la France et la Chine ?**

Alors à quoi la taxe doit-elle ressembler ? Doit-elle porter sur les exportations ou les importations ? Doit-on taxer l'ensemble des émissions incorporées ou seulement les fuites de CO₂ ? Nous

³⁴ 60 milliards à partir de 2015 et 100 milliards de dollars pour 2020, promis par les états dans l'accord de Cancun.

savons en outre que les études sur la taxation du carbone sont nombreuses, et à ce propos Böhringer *et al* (2012) mène une analyse complète des méthodes de taxation du carbone incorporé au commerce. L'auteur compare plusieurs méthodes de taxation et suivant des critères tels que la facilité de mise en place, la justesse de comptabilisation des responsabilités, l'auteur tente de déterminer la façon la plus efficace pour taxer les émissions incorporées au commerce. Ses conclusions avancent qu'une taxation suivant l'intensité d'émission directe (et non intensité totale) serait la mesure la plus simple, et la plus efficace, à mettre en place. Est-ce aussi le cas dans le commerce France-Chine ?

Pour apporter des éléments de réponse, nous procéderons à deux analyses. i) Dans le cadre du commerce France-Chine, une taxe sectorielle sur *les émissions directes*³⁵ incorporées aux exportations est-elle de meilleure qualité qu'une taxe sectorielle sur les *émissions totales*³⁶ incorporées aux exportations ? ii) Aussi, devrait-on imposer l'ensemble des émissions incorporées au commerce ou seulement la BEET ? iii) Enfin, nous discuterons intuitivement de la possibilité d'intégrer les créations/réductions des émissions de CO₂ via un nouveau mécanisme de flexibilité dans le protocole de Kyoto.

i) Émissions directes ou émissions totales ?

Taxer les exportations permet de conserver les recettes à l'intérieur du pays, et donc est plus facilement acceptable pour les politiques qui décideraient de mettre en place une taxe carbone conjointe. Les données s'appliquant de façon similaire pour un cas comme pour l'autre, nous avons choisi de considérer seulement les taxes sur les exportations.

Dans cette section nous souhaitons faire un choix entre deux scénarios :

- Scénario 1 : Une taxe sur les émissions directes incorporées aux exportations
- Scénario 2 : Une taxe sur les émissions totales incorporées aux exportations

Tout d'abord, commençons par calculer les recettes des taxes dans chacun des deux scénarios, le tableau 5.4 résume les principaux résultats.

³⁵ Utilisation de l'intensité directe pour calculer le CO₂ incorporé aux exportations.

³⁶ Utilisation de l'intensité totale

Table 5.4 Scénario de taxe à 20\$ sur les émissions directes/totales incorporées aux exportations

		Scénarios A et B : Taxe de \$20 par tonne de CO2 directe ou totale.								
		Unité:M\$	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
FRANCE	Taxe des émissions directes (A)	4 M\$	6	6	6	6	6	5	6	7
	Taxe des émissions totales (B)	12	17	18	18	16	14	14	14	19
	Ratio B/A	304%	304%	276%	287%	263%	253%	248%	248%	271%
CHINE	Taxe des émissions directes (A)	40	40	47	39	42	35	35	35	52
	Taxe des émissions totales (B)	154	160	179	155	177	148	148	148	247
	Ratio B/A	383%	399%	377%	400%	418%	421%	421%	424%	476%

Première observation frappante, les recettes de la taxe du scénario A sont sensiblement plus faibles que celles du second scénario. L'explication est très simple, l'intensité totale d'émission de CO2 est calculée avec la demande finale de chaque secteur, alors que l'intensité directe l'est avec l'output. Évidemment, l'output comptabilise la consommation intermédiaire ET la demande finale, ce qui donne des valeurs d'intensité directe plus faibles que celles de l'intensité totale.

Nous souhaiterions pouvoir **comparer des scénarios équivalents**, alors pour régler le problème et faire correspondre les recettes de taxes des deux scénarios nous avons tenté de monter un indice de l'intensité directe d'émission de CO2 construit avec la demande finale et non pas avec l'output. Il s'avère que les résultats obtenus ne sont pas interprétables.

- Premièrement, certains secteurs ont une activité essentiellement basée sur la vente de consommations intermédiaires et d'autres essentiellement sur la demande finale, l'amplitude des intensités directes ainsi calculées atteint 1 pour 1000.
- En second lieu, à cause d'une importante variation des stocks (à la baisse) et d'une très faible consommation des ménages, certains secteurs se voient imputés d'une demande finale négative, ce qui rend les résultats incohérents.

Cette première solution en fonctionnant pas, nous avons opté au final pour un redressement du prix de la taxe carbone. Pour ce faire, nous utilisons annuellement et pour chaque pays, le ratio B/A du tableau 5.4 pour recalculer la taxe carbone du scénario 1. Les recettes entre les deux systèmes ainsi égalisées, nous pouvons procéder à une comparaison intersectorielle afin de déterminer la différence des recettes pour chaque secteur et pour chaque méthode de taxation.

Pour choisir entre les deux méthodes de taxation, nous utilisons une intuition très simple. Plus les recettes sectorielles d'un scénario de taxe sont élevées, et plus le secteur sera incité à développer des programmes de réduction d'émission de CO₂. En corollaire, plus un secteur aura du potentiel dans la réduction d'émission de CO₂ et plus les politiques vont *préférer* une taxe élevée, pour bénéficier de meilleurs rendements coûts/bénéfices.

Afin d'associer un scénario particulier de taxe à chaque secteur, nous devons utiliser la totalité des résultats du chapitre 4. Aussi, ces résultats vont nous permettre de déterminer le potentiel de réduction des émissions de CO₂ de chaque secteur, dans trois catégories différentes : l'échelle, la composition, la technologie.

Nous résumons dans le tableau 5.5 les principaux vecteurs de réduction d'émission de CO₂, ainsi que le type de secteur préférant une taxe relativement plus élevée sur les exportations :

Table 5.5 Objectifs d'une taxe carbone

Vecteur	Type de secteur préférant : Une taxe relativement élevée	Paramètre de sélection
Réduction via l'effet technique	Secteurs au potentiel d'amélioration technologique le plus important	Nous considérons les 10 secteurs dont l'effet technique en pourcentage est le plus important sur les 8 années d'étude (parties 4.3.3, et 4.3.4).
Réduction via l'effet d'échelle	Secteurs dont les exportations sont les plus importantes	Nous considérons les 10 effets d'échelle les plus importants sur les 8 années d'étude.
Réduction via l'effet de composition	Secteurs les plus sensibles à l'effet de composition	Dans la partie 4.3.2, nous considérons les secteurs de catégorie 3 et 4 sur les 8 années d'étude.

Le tableau 5.6 présente les recettes des deux scénarios de taxe pour les exportations chinoises de l'année 2003. Aussi, selon la valeur de la taxe payée par chaque secteur, et les résultats des parties précédentes, nous avons déterminé un scénario de taxe préférable pour réduire les émissions de CO2 via l'effet d'échelle, l'effet technique, ou l'effet de composition.

Table 5.6 Comparatif sectoriel Chine, des scénarios de taxe directe ou de taxe totale, année 2003.

CHINE 2003	Recettes taxe ³⁷ (M\$) émission directes	Recettes taxe ³⁸ (M\$) émissions totales	Effet de composition Système préféré	Effet d'échelle : Système préféré	Effet technique Système préféré
Agriculture	1,3 M\$	0,7	Total	Total	Total
Extraction	3,0	1,2	Direct	Total	Total
Agro-alimentaire	3,1	2,6	Total	Total	Direct
Textiles	43,2	39,7	Total	Direct	Total
Produits du bois	1,4	2,2	Direct	Direct	Total
Produits du papier	1,3	0,9	Direct	Total	Total
Produits énergétiques	11,9	5,8	Direct	Total	Total
Produits chimiques	36,4	18,4	Direct	Direct	Direct
Plastiques	7,9	8,5	Total	Total	Direct
Produits minéraux	26,8	7,7	Direct	Direct	Total
Sidérurgie	7,1	2,7	Direct	Total	Direct
Ouvrages en métaux	9,9	13,2	Total	Total	Direct
Machines & matériel	8,8	25,0	Total	Total	Direct
Machines informatiques	37,4	53,3	Direct	Total	Total
Machines électriques	3,3	14,7	Direct	Total	Total
Matériel communication	8,7	19,1	Direct	Total	Total
Instruments de précision	3,6	5,9	Direct	Direct	Total
Matériel de Transport	3,7	8,0	Total	Direct	Direct
Autres manufactures	28,1	17,4	Direct	Direct	Total

Le tableau 5.7 présente les mêmes données dans le cas français.

³⁷ La taxe a été calculée à \$95 / tonnes

³⁸ La taxe est de \$20 / tonnes

Table 5.7 Comparatif sectoriel France, des scénarios de taxe directe ou de taxe totale, année 2003.

FRANCE 2003	Recettes taxe ³⁹ (K\$) émission directes	Recettes taxe ⁴⁰ (K\$) émissions totales	Effet de composition Système préféré	Effet d'échelle Système préféré	Effet technique Système préféré
Agriculture	714 K\$	475	Total	Total	Total
Extraction	19	14	Direct	Total	Direct
Agro-alimentaire	562	583	Total	Total	Direct
Textiles	296	336	Total	Direct	Direct
Produits du bois	10	18	Direct	Direct	Direct
Produits du papier	372	297	Direct	Total	Total
Produits énergétiques	381	168	Direct	Total	Direct
Produits chimiques	4693	2990	Direct	Direct	Direct
Plastiques	219	235	Total	Direct	Total
Produits minéraux	436	337	Direct	Direct	Direct
Sidérurgie	7590	3550	Direct	Direct	Total
Ouvrages en métaux	172	356	Total	Total	Direct
Machines & matériel	907	2373	Total	Total	Total
Machines informatiques	19	72	Direct	Direct	Direct
Machines électriques	744	1386	Direct	Total	Total
Matériel communication	479	1370	Direct	Total	Direct
Instruments de précision	106	410	Direct	Total	Total
Matériel de Transport	1251	3878	Total	Total	Direct
Autres manufactures	90	215	Direct	Direct	Total

Grâce aux résultats de l'analyse des chapitres précédents, nous avons donc déterminé quels secteurs étaient les plus sensibles aux variations technologiques, aux variations d'échelle, et aux variations de composition. Aussi dans cette partie nous avons testé les deux scénarios de taxe avec chaque effet et chaque secteur. La méthodologie utilisée devrait permettre de choisir la meilleure solution de taxation dépendamment des objectifs politiques. Par exemple, si une politique de réduction des émissions incorporées au commerce décide de se concentrer sur l'amélioration technologique d'un secteur chinois en particulièrement important comme les textiles, une taxation des émissions totales sera considérée comme plus efficace. Celle-ci aura un

³⁹ La taxe à été calculée à \$54 / tonnes

⁴⁰ La taxe est de \$20 / tonnes

impact plus grand sur la quantité d'exportations du secteur des textiles, et donc une incitation à réduire les émissions plus élevée.

En conclusion, nous apportons une méthodologie de détermination d'une taxe idéale qui complète l'étude de Böhringer (2012). Nous considérons qu'une taxe carbone sur l'économie globale va influencer les secteurs par le biais de 3 canaux, la technologie, la répartition de la production, et l'échelle de la production. Aussi tous les secteurs de l'économie ne réagissant pas de la même façon à la taxation, cette méthodologie permet de comprendre comment chaque secteur pourra réagir en fonction du canal étudié, du niveau de pollution, et des caractéristiques des autres secteurs.

ii) Taxe sur les émissions incorporées au commerce, sur la BEET, ou autre ?

Dans cette section plus courte, nous souhaitons mesurer l'importance de chaque scénario par rapport aux indicateurs classiques des pays. Les mesures ont été obtenues par la combinaison des résultats des parties précédentes (chapitre 3 à 5) avec une des conclusions de la section précédente⁴¹ pour plusieurs niveaux de taxation.

La table suivante résume le scénario de taxation des émissions incorporées aux exportations de nos deux pays.

Table 5.8 Scénario de taxe 2, émissions créées

	Recettes en M\$	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Taxe 50\$ / tonne	FRANCE	10 M\$	14	16	16	15	14	14	18
	% valeur de X ⁴²	0,4%	0,4%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,4%	0,3%
	CHINE	100	100	119	97	106	88	87	130
	% valeur de X ⁴³	5,3%	4,3%	4,2%	3,3%	2,8%	2,4%	2,1%	1,8%

Comme nous pouvions nous y attendre, les recettes de la taxe française sont beaucoup moins importantes par rapport à la valeur de ses exportations. Concernant la Chine, et pour une taxe de 50\$ / tonne de CO2 incorporée directement aux exportations, les recettes atteignent 5,3% de la

⁴¹ Une mesure via l'intensité directe d'émission de CO2 est préférable d'un point de vue global

⁴² Exportations françaises vers la Chine

⁴³ Exportations chinoises vers la France

valeur totale des exportations en 1996. Elles tombent à 1,8% en 2003 ce qui reste une valeur élevée et un incitatif puissant.

La taxation de la BEET⁴⁴ n'est rien d'autre que la différence entre les recettes françaises et les recettes chinoises. Si par exemple une politique décidait de taxer les fuites de CO₂, et donc le déficit de la BEET, la taxe deviendrait une taxe sur les émissions incorporées aux produits importés qui dépassent celles des produits exportés. Cette fois-ci les recettes de la taxe sur les fuites de CO₂ changent de main.

Table 5.9 Taxation des fuites de CO₂

	Recettes en M\$	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Taxe	FRANCE	91	86	102	81	91	74	73	112
50\$ /	% valeur de M ⁴⁵	1,5%	1,3%	1,4%	1,0%	0,9%	0,8%	0,7%	0,7%
tonne	% valeur de X ⁴⁶	4,8%	3,7%	3,6%	2,8%	2,4%	2,0%	1,8%	1,5%

La tableau 5.9 indique que dans notre cas d'étude, et considérant une taxe sur les fuites de CO₂, c'est la France qui devra taxer ses produits d'importation. Une telle taxe serait difficile à mettre en place puisqu'elle augmentera le coût des produits chinois sans pour autant que la Chine puisse conserver le surplus d'argent. De plus, dans le cadre France-Chine la différence entre valeur des importations françaises depuis la Chine, et valeur des exportations chinoises vers la France est énorme. En 1996 les importations coutent 3 fois plus d'argent à la France que le prix de l'exportation en Chine. À partir de 2000, cette différence diminue, mais elle reste toujours suffisamment élevée. Cette différence de prix a pour effet de diminuer la charge sociale d'une taxe pour la France, mais de l'augmenter pour la Chine, et ainsi décourager la Chine d'engager un processus de discussions bilatérales.

iii- Un nouveau mécanisme de flexibilité

Dans l'hypothèse d'une troisième phase d'engagement au protocole de Kyoto, non mondialement contraignante, pourra-t-on encadrer la création/réduction de CO₂ ? Dans l'idéal, si une troisième

⁴⁴ Comptabilisée avec l'intensité directe

⁴⁵ Données d'importation française depuis la Chine (comprenant douane, frais de ports, et pertes, utilisées).

⁴⁶ Données d'exportations chinoises vers la France

phase d'engagement du protocole de Kyoto est décidée, mais qu'elle n'inclut pas l'ensemble des pays du monde, elle devra encadrer les fuites de CO₂, et la création de CO₂ par le commerce. Pour cela une taxe n'est pas toujours nécessaire, et nous pourrions utiliser les intuitions de la partie 5.1 pour imaginer un simple mécanisme de transfert d'émissions.

Tout comme pour les mécanismes de flexibilité du protocole de Kyoto, nous pouvons imaginer un *mécanisme d'encadrement des émissions incorporées au commerce*, et considérons les transferts d'émission en crédits carbone⁴⁷ au lieu des termes monétaires. Considérons les exportations et l'intensité d'un pays relativement propre (respectivement X^p et E^p), et celles d'un pays relativement polluant (respectivement X^s et $E^s > E^p$). Ce mécanisme de flexibilité offrirait :

- a. Des crédits carbone accordés aux pays relativement propres exportant dans des pays relativement polluants :

$$\text{Crédits carbone du pays propre: } C^p = -X^p(E^p - E^s)$$

En effet, ce type d'exportation diminue la pollution dans le pays relativement polluant qui importe les biens polluants, et un pays propre contraint pourrait donc être légalement encouragé à exporter vers les pays relativement plus polluants. Grâce aux crédits carbone il pourrait compenser les émissions nécessaires à l'exportation, et faire un profit.

- b. Une réduction des crédits carbones dans le cas où un pays relativement propre importerait depuis un pays polluant.

$$\text{crédits carbone du pays propre: } C^p = X^s(E^s - E^p)$$

En effet, ce type d'exportation crée du CO₂, importer des produits plus polluants devrait donc être limité au maximum, le surplus d'émissions causé par l'importation devrait donc revenir au pays importateur, relativement moins polluant, et contraint par un protocole.

La tableau 5.10 présente les crédits carbones accordés ou retirés à la France. Dans le cadre du commerce avec la Chine, et dans l'hypothèse où seule la France serait contrainte par une troisième phase d'engagement.

Table 5.10 Crédits carbone français.

⁴⁷ Un crédit carbone est une dérogation au protocole autorisant de produire 1 tonne de CO₂ supplémentaire.

Milliers de crédits	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Crédits accordés France	11 396	13 315	12 426	9 339	7 422	5 803	6 082	9 652
Crédits retirés France	-7 293	-7 489	-8 304	-7 093	-8 102	-6 671	-6 739	-11 336
TOTAL	4 103	5 826	4 123	2 246	-680	-868	-657	-1 684
Total cumulé 1995 = 0	4 103	9 930	14 052	16 298	15 619	14 751	14 094	12 410

Remarquons que les résultats du modèle sont tirés de la figure 5.1. On y retrouve le rapport entre émissions avec ou sans commerce. Dans le cas de la transformation de ce modèle en mécanisme d'encadrement des émissions incorporées au commerce, la France conserve un excédent de crédit tout au long des années d'observation. Cependant, celui-ci diminue rapidement à partir de 2000, et si la tendance suit celle de la figure 1.2 les crédits français risquent rapidement de se transformer en contraintes supplémentaires.

6 Conclusion

Dans ce mémoire de Maitrise, nous avons commencé par explorer la littérature existante en matière de relations entre commerce et environnement. Ensuite, nous avons présenté des résultats généraux : les intensités d'émission de la France et de la Chine, la BEET de la France, la relation entre commerce et environnement. Dans la seconde partie, nous avons poussé l'analyse, notamment en étudiant l'ensemble des changements survenus durant toutes nos années d'études suivant trois vecteurs : l'effet d'échelle, l'effet de composition et l'effet technique. Dans la dernière partie, nous avons procédé à une analyse intuitive des effets directs que le commerce peut avoir sur l'environnement, puis toujours grâce à nos intuitions nous avons démarré une discussion sur l'encadrement des émissions incorporées au commerce.

Rappelons que le cas du commerce entre la France et de la Chine n'est pas exempt de fuites de CO₂. La forte différence d'intensité entre les deux pays, mêlée à une expansion des importations françaises et une stagnation des exportations, a visiblement créé une situation de déficit de CO₂ pour la France. Le déficit de la BEET s'établit à 7,1 millions de tonnes en 1996, et augmente jusqu'à 11,4 millions de tonnes en 2003. Considérant les clauses d'engagement du protocole de Kyoto ce déficit est un cas avéré de fuites de CO₂, **en 2003 elles représentent donc 2,9% du total d'équivalent CO₂ de la France, c'était 1,9% en 1996**. Bien que ces fuites ne remettent pas en cause les objectifs français pour Kyoto, elles restent élevées, non encadrées et en phase d'augmentation (Section 3.3.2).

En outre, nous avons vu que le commerce entre la France et la Chine entraîne un phénomène plus grave que les fuites de CO₂. Les deux pays possèdent un niveau de développement différent, qui comme nous l'avons prévu, entraîne une forte différence d'intensité d'émissions. La Chine pollue en effet 11,3 fois plus que la France en 1996, et 8,6 fois plus en 2003. Alors, le fait que la France importe des produits chinois va créer du CO₂ en comparaison avec un cas sans commerce entre les deux pays. En réalité nous observons qu'en 2003, 11,3 millions de tonnes de CO₂ auraient pu être évitées si la France n'importait pas depuis la Chine. Mais nous découvrons qu'il existe aussi

le phénomène inverse, le fait que la Chine importe des produits conçus en France, réduit l'émission par rapport à une hypothétique situation sans commerce. En 2003, la France aura ainsi évité à la Chine de produire 9,7 millions de tonnes de CO₂. Cet écart entre les émissions créées et les émissions réduites nous laisse penser que le commerce aurait un effet de plus en plus néfaste sur l'environnement. En 1997, **le commerce a réduit de 5,9 millions de tonnes de CO₂ les émissions incorporées au commerce. En 2003 nous comptabilisons 1,7 million de tonnes CO₂ créées** (Section 5.1.1).

Une question se pose, comment le commerce entre la France et la Chine, autrefois profitable pour l'environnement, a pu parvenir à cette situation déplaisante ?

L'exploration de la littérature existante nous a montré que le commerce international agit à titre autonome sur l'environnement par le biais de trois vecteurs, **l'effet d'échelle, l'effet de composition, et l'effet technique**. En période de croissance, le commerce international exerce une pression sur l'environnement par l'effet d'échelle, qui va augmenter les émissions de GES au fur et à mesure de l'expansion des échanges. Nous l'avons vu dans notre cas d'étude, sur la période de 8 ans, l'augmentation de la demande française est responsable d'une hausse de 164% des émissions incorporées dans les exportations chinoises. De même, l'augmentation de la demande chinoise est responsable d'une hausse de 90% des émissions incorporées aux exportations françaises (Section 4.3.1).

Il existe cependant des possibilités de congestion de cet effet d'échelle, la plus importante est l'effet technique. Un secteur de l'économie peut réduire son intensité d'émission en augmentant son efficacité énergétique, en coupant dans ses CI les plus polluantes, ou bien en optant pour l'utilisation de combustibles moins polluants. Ce changement d'intensité d'un secteur va affecter l'ensemble du processus de production et ira jusqu'à modifier les émissions incorporées au commerce des autres secteurs. Notons que cette observation nous a permis de relever une grande différence entre la Chine et la France. Les secteurs de la chimie et de la sidérurgie sont les plus importants en Chine, en France c'est le secteur des services qui impose ses émissions au circuit économique (Sections 4.3.3 et 4.3.4).

Enfin, il existe un dernier effet qui affecte les émissions incorporées au commerce. Suivant les changements de la composition des exportations, les émissions peuvent augmenter ou bien diminuer. Notre analyse révèle qu'entre 1997 et 2003, la baisse des exportations de matériel de transport français et l'augmentation des exportations de matériel informatique chinois sont responsables de près de 60% de la différence entre la réduction de CO₂ de 1997 et la création de CO₂ en 2003 (Section 5.3.3). À la lumière de ces données, l'effet de composition n'apparaît plus comme marginal par rapport à l'effet d'échelle et l'effet technique, il devrait donc être considéré comme un vecteur de lutte contre les GES très intéressant pour les politiques. En effet, sans modifier la balance commerciale, des incitations pourraient modifier la composition du commerce et ainsi réduire les émissions de CO₂ (Section 4.3.2).

Nous sommes alors en face d'un problème concernant aussi bien les clauses du protocole de Kyoto que la lutte contre les changements climatiques provoqués par les émissions de GES. En réalité, notre seul traité international de lutte contre les changements climatiques ne prend pas en compte l'effet pervers que peut avoir le commerce international sur l'environnement. Pire, il apparaît que le protocole de Kyoto pourrait éventuellement pousser les pays développés à bénéficier de fuites de CO₂ pour atteindre leurs engagements, et une grosse partie de ces fuites seraient une création nette de CO₂ qu'il faudrait éviter à tout prix.

Rappelons que rien ne prouve qu'aucun pays développé n'ait jamais profité du commerce international pour respecter ses engagements concernant le protocole de Kyoto. Aussi, avec ou sans protocole de Kyoto la situation vis-à-vis du commerce international resterait la même. Ni le protocole de Kyoto, ni les états ne sont alors responsables de ce phénomène naturel. Néanmoins, nous montrons là une possibilité de lutte contre les changements climatiques qu'il faudrait prendre en compte.

Dans la dernière partie de notre étude, nous démarrons à ce propos une discussion sur différentes méthodes d'encadrement des émissions de CO₂ : un basculement ou un partage de responsabilité, des méthodes de taxation, ou un nouveau mécanisme de développement propre. Notre discussion avance que la promotion des avantages comparatifs environnementaux, le potentiel de réduction d'émission de chaque secteur, et les besoins des PED, doivent tous être intégrés dans une solution

globalement contraignante.

De façon intuitive notre analyse révèle enfin que l'encadrement des émissions incorporées au commerce pourrait être peu coûteux s'il est réalisé avec intelligence. On ne parle pas de limite à l'expansion du commerce, mais au contraire d'une restructuration stratégique de sa composition. Par exemple : des incitatifs à la modification de la composition du commerce, sous forme de bonus/malus, distribué par les états eux-mêmes à leurs industries, et négociés annuellement de façon bilatérale avec les partenaires internationaux, pourraient représenter un premier pas vers une réduction substantielle de CO₂ à l'échelle planétaire.

En conclusion de l'analyse, retenons que nous avons pu mettre en évidence des problèmes dans l'interface du protocole de Kyoto (fuites de CO₂, et création de CO₂). Nous avons mesuré ces problèmes, et nous avançons que leur encadrement pourrait, d'une part les contrôler dans l'avenir, et d'autre part faire avancer rapidement la lutte contre les changements climatiques.

En guise d'ouverture nous aimerions porter l'attention sur trois points. Le premier est la couverture temporelle et géographique de notre étude qui mériterait d'être toute deux élargies. Notre cas d'étude bilatéral capte d'importantes transformations dans le commerce France Chine. Pourtant, nous ne couvrons pas une période de temps assez longue pour capter l'augmentation exponentielle dans exportations chinoises après son adhésion à l'OMC. Aussi il est clair que l'étude bilatérale de l'ensemble des partenaires français serait un apport conséquent à la connaissance scientifique.

Second point, la méthodologie utilisée, notamment pour la SDA, est très avancée. Pourtant encore une fois elle souffre de petits défauts concernant la mesure de l'effet de composition, et la mesure de substitution des combustibles. Il est clair que cette méthodologie universelle mériterait d'être développée davantage afin de faire ressortir la qualité des données utilisées.

Enfin, notre discussion sur les solutions reste intuitive, peu contraignante et accessible. Ces qualités qui ont permis une lecture simple et reposante font souffrir l'analyse d'un certain manque de précision. En effet, nous aurions grandement apprécié pouvoir calculer via un modèle

d'équilibre général dynamique les modifications de composition, d'échelle ou technique, induites par les taxes incitatives. Des plus, les paramètres environnementaux d'un tel modèle peuvent facilement être mis en place grâce aux résultats et aux équations de notre analyse.

En combinant les trois points mentionnés, les politiques pourraient être capables de réaliser une véritable prospective de la mise en place d'un encadrement global des émissions de CO₂. Malheureusement ce travail est bien trop important pour être contenu dans un mémoire de maîtrise, mais peut-être suffisant à un projet de recherche de 3^{ième} cycle.

7 Bibliographie

- ACKERMAN Frank, Masanobu Ishikawa, Mikio Suga, "The carbon content of Japan-US trade", *Energy Policy*, Vol. 35, pp. 4455-4462, (2007)
- AHMAD N., A. Wyckoff, "Carbon Dioxide Emissions Embodied in International Trade of Goods", *OECD Science, Technology and Industry Working Paper*, OECD Publishing, (2003)
- AKTINSON Giles, Kirk Hamilton, Giovanni Ruta, Dominique Van Der Mensbrugghe, "Trade in 'Virtual Carbon' Empirical Results and Implications for Policy", *Policy Research, Working Paper 5194*, (2010)
- ALBRECHT J., Francois D., Schoors K., "A Shapley decomposition of carbon emissions without residuals", *Energy Policy*, Vol. 30, No. 9, pp. 727–736, (2002)
- ANG B.W., "Decomposition of industrial energy consumption", *Energy Economics*, Vol. 16, No. 3, pp. 163-174, (1994)
- ANG B.W., "Decomposition methodology in industrial energy demand analysis", *Energy*, Vol. 20, No. 11, pp. 1081–1095, (1995)
- ANG B.W., "Decomposition analysis for policymaking in energy: wich is the preferred method?", *Energy Policy*, Vol. 32, pp. 1131-1139, (2004)
- ANG B.W., "The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide", *Energy Policy*, Vol. 33, pp. 867-871, (2005)
- ANG B.W., Choi K.H., "Decomposition of aggregate energy and gas emission intensities for industry : a refined Divisia index method", *The Energy Journal*, Vol. 18, No. 3, pp. 59–73, (1997)
- ANG B.W., Choi K.H., Zhang F.Q., "Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition", *Energy*, Vol. 23, No. 6, pp. 489–495, (1998)
- ANG B.W., Lee S.Y., "Decomposition of industrial energy consumption, Some methodological and application issues", *Energy Economics*, Vol. 16, No. 2, pp. 83-92, (1994)
- ANG B.W., Liu Na, "Handling zero values in the logarithmic mean Divisia index decomposition approach", *Energy Policy*, Vol. 35, pp. 238-246, (2007a)
- ANG B.W., Liu Na, "Negative-value problems of the logarithmic mean Divisia index decomposition approach", *Energy Policy*, Vol. 35, pp. 739-742, (2007b)

- ANG B.W., Liu F.L., Chung H.S., "Index numbers and the Fisher ideal index approach in energy decomposition analysis", Department of Industrial and Systems Engineering, National University of Singapore, Research Report, Vol. 38, (2002)
- ANG B.W., Pandiyan G., "Decomposition of energy-induced CO₂ emissions in manufacturing", *Energy Economics*, Vol. 19, No. 3, pp. 363-374, (1997)
- ANG B.W., Zhang F.Q., "A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies", *Energy*, Vol. 25, pp. 1149–1176, (2000)
- ANG James B., "CO₂ emissions, energy consumption, and output in France", *Energy Policy*, Vol. 35, pp. 4772-4778, (2007)
- ANTWEILER Werner, Brian R. Copeland, M. Scott Taylor, "Is Free Trade Good for the Environment ?", *The American Economic Review*, Vol. 91, No. 4, pp. 877-908, (2001)
- BASTIANONI Simone, Federico Maria Pulselli, and Enzo Tiezzi, "The problem of assigning responsibility for greenhouse gas emissions", *Ecological Economics*, Vol. 49, pp. 253–257, (2004)
- BOHRINGER Christoph, Brita Bye, Taran Faehn, Knut Einar Rosendahl, "Alternative designs for tariffs on embodied carbon: A global cost-effectiveness analysis", *Energy Economics*, Vol. 34, pp. S143-S153, (2012)
- CARBON TRUST, "Global Flows", The Carbon Trust, (2011)
- CHEN Z.M., C.Q. Chen, "Embodied carbon dioxide emission at supra-national scale: A coalition analysis for G7, BRIC, and the rest of the world", *Energy Policy*, pp. 2899-2909, (2011)
- CHUNG H.S., Rhee H.C., "A residual-free decomposition of the sources of carbon dioxide emissions: a case of the Korean industries", *Energy*, Vol. 26, No. 1, pp. 15–30, (2001).
- COLE Matthew A., Robert J.R. Elliot, "Determining the trade-environment composition effect: the role of capital, labor and environmental regulations", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 46, pp. 363-383, (2003)
- COPELAND Brian R., M. Scott Taylor, "Trade, Growth, and the Environment", *Journal of Economic Literature*, Vol. 42, No. 1, pp. 7-71, (2004)
- DAVIS Steven J., Glen P. Peters, Ken Caldeira, "The supply chain of CO₂ emissions", Harvard, Cambridge, MA, (2011).
- DONG Yanli, Masanobu Ishikawa, Xianbing Liu, Can Wang, "An analysis of the driving forces of CO₂ emissions embodied in Japan-China trade", *Energy Policy*, Vol. 38, pp. 6784-6792, (2010)
- DU H., Guo J., Mao G., Smith A. M., Wang X., Wang Y., "CO₂ emissions embodied in China-

- US trade: input-output analysis based on the emergy/dollar ratio" *Energy Policy*, Vol. 39, pp. 5980-5987, (2011).
- EDENS Bram, Roel Delahaye, Maarten van Rossum, Sjoerd Schenau, "Analysis of changes in Dutch emissions trade balance(s) between 1996 and 2007", *Ecological Economics*, Vol. 70, pp. 2334-2340, (2011)
- FERGUSON Thomas M., Heather L. MacLean, "Trade-linked Canada-United States household environmental impact analysis of energy use and greenhouse gas emissions", *Energy Policy*, Vol. 39, pp. 8011-8021, (2011)
- FERNG Jiun-Jiun, "Allocating the responsibility of CO₂ over-emissions from the perspectives of benefit principle and ecological deficit", *Ecological Economics*, Vol. 46, pp. 121-141, (2003)
- FRANKEL Jeffrey, Andrew K. Rose, "Is trade Good or Bad for the Environment? Sorting Out the Causality", *Harvard University, Faculty Research Working Papers Series*, (2003)
- GALLEGO Blanca, Manfred Lenzen, "A Consistent Input-Output Formulation of Shared Producer and Consumer Responsibility", *Economic Systems Research*, Vol. 17, No. 4, pp. 365-391, (2005)
- GIEC, "Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre" *Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat, WMO, UNEP*, (2006)
- GROSSMAN Gene M, Alan B. Krueger, "Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement", P. Garber, édition: Cambridge, MA: MIT Press, (1993)
- GUO Jie, Le-Le Zou, Yi-Ming Wei, "Impact of inter-sectoral trade on national and global CO₂ emissions: An empirical analysis of China and US", *Energy Policy*, Vol. 38, No. 3, pp. 1389–1397, (2010)
- HE Jie, "Environmental impacts of international trade: the case of industrial emission of Sulfur Dioxide (SO₂) in Chinese provinces", *CERDI, Etudes et documents, Ec* (2005)
- HE Jie, "Pollution haven hypothesis and environmental impacts of foreign direct investment: The case of industrial emission of sulfur dioxide (SO₂) in Chinese provinces", *Ecological economics*, Vol. 60, pp. 228–245, (2006)
- HE Jie, "What is the role of openness for China's aggregate industrial SO₂ emission?: A structural analysis based on the Divisia decomposition method", *Ecological Economics*, Vol. 69, pp. 868-886, (2010)
- HE Jie, Jingyan Fu, "Carbon leakage in China's manufacturing trade: An empirical analysis based on the carbon embodied in trade", *The Journal of international Trade & Economic Development: An international and Comparative review*, DOI:10.1080/09638199.2012.713389, (2012)

- KEJUN Jiang, Aaron Cosbey, Deborah Murphy, "Embodied Carbon in Traded Goods", International Institute for sustainable Development, (2008)
- KELLENBERG Derek K., "A reexamination of the role of income for the trade and environment debate", *Ecological economics*, Vol. 68, pp. 106-115, (2008)
- HERTWICH Edgar G., Glen P. Peters, "Carbon Footprint of Nations: A Global, Trade-Linked Analysis", *Environmental Science Technology*, Vol. 43, pp. 6414-6420, (2009)
- KRATENA Kurt, and Ina Meyer, "CO₂ Emissions Embodied in Austrian International Trade", *FIW Research Reports*, No. 2, (2010)
- LENZEN Manfred, Joy Murray, Fabian Sack, and Thomas Wiedmann, "Shared producer and consumer responsibility — Theory and practice", *Ecological Economics*, Vol. 61, pp. 27–42, (2007)
- LEONTIEF W., Ford D., "Environmental repercussions and the economic structure: an input-output approach", *Review of Economics and Statistics*, Vol. 52, No. 3, pp. 262-271, (1970)
- LI You, C.N. Hewitt, "The effect of trade between China and the UK on national and global carbon dioxide emissions", *Energy Policy*, Vol. 36, pp. 1907-1914, (2008)
- LIDDLE Brantley "Free trade and the environnement-development system", *Ecological Economics*, Vol. 39, pp. 21-36, (2001)
- LIN Boqiang, Chuanwang Sun, "Evaluating carbon dioxide emissions in international trade of China", *Energy Policy*, Vo. 38, No. 1, pp. 613–621, (2010)
- LIU Hongtao, Youmin Xi, Ju'e Guo, Xia Li, "Energy embodied in the international trade of China: An energy input-output analysis", *Energy Policy*, Vol. 38, pp. 3957-3964, (2010)
- MACHADO Giovani, Roberto Schaeffer, Ernst Worrell, "Energy and carbon embodied in the international trade of Brazil: an input–output approach", *Ecological Economics*, Vol. 39, pp. 409–424, (2001).
- MÄENPÄÄ Ilmo, Hanne Siikavirta, "Greenhouse gases embodied in the international trade and final consumption of Finland: An input–output analysis", *Energy Policy*, Vol. 35, No. 1, pp. 128–143, (2007)
- MANAGI Shunsuke, Akira Hibiki, Tetsuya Tsurumi, "Does trade openness improve environmental quality?", *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 58, pp. 346-363, (2009)
- MCGREGOR Peter G., J. Kim Swales, Karen Turner, "The CO₂ 'trade balance' between Scotland and the rest of the UK: Performing a multi-region environmental input-output analysis with limited data", *Ecological Economics*, Vol. 66, pp. 662-673, (2008)

- MONGELLI I., G. Tassielli, B. Notarnicola, "Global warming agreements, international trade and energy/carbon embodiments: an input-output approach to the Italian case", *Energy Policy*, Vol. 34, pp. 88-100, (2006)
- MUNKSGAARD Jesper, Klaus Alsted Pedersen, "CO₂ accounts for open economies: producer or consumer responsibility?", *Energy Policy*, Vol 29, pp. 327-334, (2001)
- MUNOZ Pablo, Karl W. Steininger, "Austria's CO₂ responsibility and the carbon content of its international trade", *Ecological Economics*, Vol. 69, No. 10, pp. 2003-2019, (2010)
- MURADIAN Roldan, Martin O'Connor, Joan Martinez-Alier, "Embodied pollution in trade: estimating the 'environmental load displacement' of industrialised countries", *Ecological Economics*, Vol. 41, pp. 51-67, (2002)
- PAN Jiahua, Jonathan Phillips, Ying Chen, "China's balance of emissions embodied in trade: approaches to measurement and allocating international responsibility", *Oxford Review of Economic Policy*, Vol. 24, No. 2, pp. 354-376, (2008)
- PARK S.H., Dissmann B., Nam K.Y., "A cross-country decomposition analysis of manufacturing energy consumption", *Energy*, Vol. 18, No. 8, pp. 843-58, (1993)
- PETERS Glen P., Edgar G. Hertwich, "Pollution embodied in trade: The Norwegian case", *Global Environmental Change*, Vol. 16, pp. 379-387, (2006)
- PETERS Glen P., "From production-based to consumption-based national emission inventories", *Ecological Economics*, Vol. 65, pp. 13-23, (2008)
- PETERS Glen P., Edgar G. Hertwich, "Carbon Footprint of Nations: A Global, Trade-Linked Analysis", *Environmental Science Technology*, Vol. 43, pp. 6414-6420, (2009)
- PETERS G.P., Minx J.C., Weber C.L., Edenhofer O., "Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008", Harvard University, Cambridge, MA, (2011)
- REES William Rees, Mathis Wackernagel, "More Jobs, Less Damage : A Framework for Sustainability, Growth and Employment", New Society Publishers, (1996)
- PRINCEN Thomas, "Consumption and environment: some conceptual issues", *Ecological Economics*, Vol. 31, No. 3, pp. 347-363, (1999)
- RODRIGUES Joao, Tiago Domingos, "Consumer and producer environmental responsibility: Comparing two approaches", *Ecological Economics*, Vol. 66, pp. 533-546, (2008)
- SANCHEZ-CHOLIZ Julio, Rosa Duarte, "CO₂ emissions embodied in international trade: evidence for Spain", *Energy Policy*, Vol. 32, No. 18, pp. 1999-2005, (2004)
- SERRANO Mònica, and Erik Dietzenbacher, "Responsibility and trade emission balances: An

- evaluation of approaches" *Ecological Economics*, Vol. 69, pp. 2224–2232, (2010)
- SHUI Bin, Robert C. Harriss, "The role of CO₂ embodiment in US-China trade", *Energy Policy*, Vol. 34, pp. 4063-4068, (2006)
- STRATFORD Douglas, Shuichiro Nishioka, "International differences in emissions intensity and emissions content of global trade", *Journal of Development Economics*, Vol 99, No. 2, pp. 415-427, (2012)
- SU Bin, H.C. Huang, B.W. Ang, P. Zhou, "Input-output analysis of CO₂ emissions embodied in trade: The effects of sector aggregation", *Energy Economics*, Vol. 32, pp. 166-175, (2010)
- SU Bin, B.W. Ang, "Multi-region input-output analysis of CO₂ emissions embodied in trade: The feedback effects", *Ecological Economics*, Vol. 71, pp. 42-53, (2011)
- SUBAL Susan, "Methane embodied in the international trade of commodities: Implications for global emissions", *Global Environmental Change*, Vol. 5, No. 5, pp. 433–446, (1995)
- SUN J.W., "Accounting for energy use in China, 1984–94", *Energy*, Vol. 23, No. 10, pp. 835–949, (1998)
- TÖRNQVIST L., Vartia P., Vartia Y., "How should relative changes be measured?" *The American Statistician*, Vol. 39, No. 1, pp. 43–46, (1985)
- VETONE Zsófia Mòzner, "Applying consumer responsibility principle in evaluating environmental load of carbon emissions", *Society and Economy*, Vol. 33, No. 1, pp. 131–144, (2011)
- VETONE Zsófia Mòzner, "A consumption-based approach to carbon emission accounting – sectoral differences and environmental benefits", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 42, pp. 83–95, (2013)
- WEI Benyong, Fang Xiuqi, Wang Yuan, "The effects of international trade on Chinese carbon emissions: An empirical analysis", *Journal of Geographical Sciences*, Vol. 21, No. 2, pp. 301-316, (2011)
- WIEDMANN Thomas, Manfred Lenzen, Karen Turner, John Barrett, "Examining the global environmental impact of regulation consumption activities — Part 2: Review of input-output models for the assessment of environmental impacts embodied in trade", *Ecological Economics*, Vol. 61, pp. 15-26, (2007)
- WILTING Harry C., Kees Vringer, "Carbon and land use accounting from a producer's and a consumer's perspective - an empirical examination covering the world", *Economic Systems Research*, Vol. 21, No. 3, pp. 291–310, (2010)
- XIANBING Liu, Masanobu Ishikawa, Can Wang, Yanli Dong, Wenling Liu, "Analyses of CO₂ emissions embodied in Japan–China trade", *Energy Policy*, Vol. 38, No. 3, pp. 1510-1518,

(2010)

XU Ming, Ran Li, John C. Crittenden, Yongsheng Chen "CO₂ emissions embodied in China's exports from 2002 to 2008: A structural decomposition analysis", *Energy Policy*, Vol. 39, pp. 7381-7388, (2011)

YUNFENG Yan, Yang Laike, "China's foreign trade and climate change: A case study of CO₂ emissions", *Energy Policy*, Vol. 38, No. 1, pp 350–356, (2010)

ZAKS D.P.M., C.C. Barford, N. Ramankutty, J.A. Foley, "Producer and consumer responsibility for greenhouse gas emissions from agricultural production—a perspective from the Brazilian Amazon", *Environmental Research Letters*, Vol. 4, 44010, (2009)

Annexes

1	Annexes chapitre 1	130
1.1	Comparatif basique de plusieurs sources d'émissions de CO2	130
1.2	Rappel sur les émissions de CO2	130
1.3	Commerce bilatéral	131
2	Annexes chapitre 2	132
3	Annexes du chapitre 3	132
3.1	Données de l'étude	132
3.2	Intensité totale sur différentes années	145
3.3	Balances	147
3.4	Relation entre commerce et environnement de 1996 à 2003	148
4	Annexes du chapitre 4	148
4.1	Traitement des données	148
4.2	Détail des énergies utilisées dans l'étude.	151
4.3	Détail équations du chapitre 4.	152
4.4	Détail des trois effets	157
4.5	Décomposition structurelle de l'effet technique.	158
5	Annexes du chapitre 5	159
5.1	Preuve de la décomposition équations (13) et (14)	159

1 Annexes chapitre 1

1.1 Comparatif basique de plusieurs sources d'émissions de CO2

Respiration humaine	500 grammes CO2 par jours
Voiture européenne, émissions classe A	0,1 tCO2 pour 1 000 km ⁴⁸
Paris-New-York en A330 (335 passagers)	130 tCO2 pour les 5 800 km du vol ⁴⁹
Volcan Eyjafjöll (Islande) en 2010	150 à 300 KtCO2 par jour ⁵⁰
Production France en 2009	1 MtCO2 par jours ⁵¹
Production chinoise en 2009	21 MtCO2 par jour ⁵²
Émissions anthropiques mondiales	36 GtCO2 pour l'année 2010 ⁵³
Bilan du reboisement de 1 ha de forêt d'épinette noire au Québec	77 tCO2 séquestré sur une période de 70 ans ⁵⁴

1.2 Rappel sur les émissions de CO2

Année	France (Kt CO2) ⁵⁵	Chine (KtCO2) ⁵⁶
1970	439 013	771 617
1971	462 434	876 633
1972	480 729	931 576
1973	516 600	968 543
1974	499 071	988 014
1975	446 919	1 145 607
1976	505 602	1 196 194
1977	480 857	1 310 311
1978	505 859	1 462 169
1979	529 155	1 494 860
1980	505 364	1 467 192
1981	454 701	1 451 501
1982	436 894	1 580 261
1983	422 603	1 667 029
1984	405 343	1 814 908

⁴⁸ INSEE

⁴⁹ OACI

⁵⁰ Le figaro 2010, publié le 19/04/2010 à 17:41

⁵¹ AIE

⁵² Idem

⁵³ Idem

⁵⁴ Gaboury 2006

⁵⁵ World data bank.

⁵⁶ Idem.

1985	400 880	1 966 553
1986	385 614	2 068 969
1987	377 492	2 209 709
1988	372 208	2 369 502
1989	390 649	2 408 541
1990	399 028	2 460 744
1991	427 668	2 584 538
1992	397 037	2 695 982
1993	389 105	2 878 694
1994	369 458	3 058 241
1995	393 289	3 320 285
1996	408 126	3 463 089
1997	379 487	3 469 510
1998	409 094	3 324 345
1999	371 309	3 318 056
2000	365 560	3 405 180
2001	385 827	3 487 566
2002	380 448	3 694 242
2003	387 147	4 525 177
2004	389 707	5 288 166
2005	391 826	5 790 017
2006	382 281	6 414 463
2007	375 684	6 791 805
2008 (Objectif Kyoto 1 ^{er} période)	376 993 (399 028)	7 037 710 (n.a.)
2009 (Objectif Kyoto 1 ^{er} période)	363 356 (399 028)	7 687 114 (n.a.)

1.3 Commerce bilatéral

Année	Exportations de France vers Chine (K\$)	Exportations de Chine vers France (K\$)
1990	1 408 682	
1991	1 373 549	
1992	1 394 541	764 203
1993	1 722 105	1 292 340
1994	2 229 026	1 426 541
1995	2 739 098	1 843 693
1996	2 521 266	1 912 740
1997	3 549 038	2 336 796
1998	3 425 353	2 830 754
1999	3 414 429	2 930 015
2000	3 059 601	3 715 888
2001	3 052 156	3 701 083
2002	3 376 374	4 087 772
2003	5 321 676	7 331 063
2004	6 757 972	9 967 437

2005	7 421 119	11 691 653
2006	10 148 388	13 978 874
2007	12 727 891	20 466 709
2008	13 675 287	23 498 662
2009	11 291 647	21 611 741
2010	14 551 253	27 858 709
2011	18 716 062	30 245 913

2 Annexes chapitre 2

N.A.

3 Annexes du chapitre 3

3.1 Données de l'étude

Plan : i) les données françaises, ii) Données chinoises, iii) TES, iv) Commerce international, v) Combustibles utilisés, vi) Tables de correspondances, vii) Classification, viii) Doubles comptables.

i- Données françaises

Agence	Service des études statistiques industrielles (SESSI)
Titre	Enquête annuelle sur les consommations d'énergie dans l'industrie
Classification	NES114 ⁵⁷
Correspondance avec STAN	Très bonne. NES114 > NAF ⁵⁸ > NACE ⁵⁹ > CITI rev 3 > STAN.
Couverture	114 secteurs, de 1996 - 2007
Source	http://www.industrie.gouv.fr/sessi/enquetes/eacei/eacei.htm

Agence	Institut National des Statistiques et Études Économiques
Titre	Enquête sur les consommations d'énergie dans l'industrie / EACEI
Classification	Nomenclature Économique de Synthèse en 114 postes (NES114)
Correspondance avec	Très bonne.

⁵⁷ Nomenclature Économique de Synthèse en 114 postes

⁵⁸ Nomenclature des Activités Françaises

⁵⁹ Nomenclature des Activités des Communautés Européennes

STAN	(NES114 > NAF > NACE > CITI ⁶⁰ rev 3 > STAN ⁶¹)
Couverture	114 secteurs, de 1996 - 2007
Source	http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=sources/ope-enq-conso-energie-industrie-eacei.htm

Agence	Agence Internationale de l'Energie
Titre	Energy Balances of OCDE countries on-line data service, 2011 edition, IEA
Classification	CITI rev 4
Correspondance avec STAN	Moyenne (Doubles comptages dans la partie viii). (CITI rev 4 > CITI rev 3.1 > CITI rev 3 > STAN)
Couverture	54 secteurs, de 1996 - 2009
Source	http://wds.iea.org/WDS/Common/Login/login.aspx

ii- Données chinoises

Agence	National Bureau of Statistics Of China
Titre	Consommation d'énergie par secteur dans l'industrie
Classification	CITI rev 3
Correspondance avec STAN	Très bonne jusqu'en 2003. (CITI rev 3 > STAN)
Couverture	50 secteurs, de 1991 - 2008
Source	http://www.stats.gov.cn

Agence	UC berkeley, Laurence center
Titre	China Statistical Yearbook 7.0
Classification	CITI rev 3
Correspondance avec STAN	Très bonne, jusqu'en 2003. (CITI rev 3 > STAN)
Couverture	35 secteurs, de 1991 - 2006
Source	http://china.lbl.gov/

Titre	Agence Internationale de l'Energie Energy Balances of OCDE countries on-line data service, 2011 edition, IEA
Classification	CITI rev 4

⁶⁰ Classification International Type par Industrie révision X

⁶¹ STructral ANalysis

Correspondance avec STAN	Moyenne (Doubles comptages dans la partie viii). (CITI rev 4 > CITI rev 3.1 > CITI rev 3 > STAN)
Couverture	54 secteurs, de 1996 - 2009
Source	http://wds.iea.org/WDS/Common/Login/login.aspx

iii- TES

Les TES sont obtenus via le site de l'OCDE, ils sont calculées par tranche de 5 ans, pour les années 1995, 2000, et 2005. Nous avons donc construit des TES virtuels pour les années intermédiaires. Le tableau suivant présente la méthode de création des années intermédiaires.

Année	Formule ⁶²
1995	
1996	$(1996)_{ij} = 80\%(1995)_{ij} + 20\%(2000)_{ij}$
1997	$(1997)_{ij} = 60\%(1995)_{ij} + 40\%(2000)_{ij}$
1998	$(1998)_{ij} = 40\%(1995)_{ij} + 60\%(2000)_{ij}$
1999	$(1999)_{ij} = 20\%(1995)_{ij} + 80\%(2000)_{ij}$
2000	
2001	$(2001)_{ij} = 80\%(2000)_{ij} + 20\%(2005)_{ij}$
2002	$(2002)_{ij} = 60\%(2000)_{ij} + 40\%(2005)_{ij}$
2003	$(2003)_{ij} = 40\%(2000)_{ij} + 60\%(2005)_{ij}$

Tableau 2, Construction des matrices Input-Output

iv - Commerce bilatéral

Concernant le commerce bilatéral, les données utilisées sont : L'exportation de produits chinois vers la France et l'exportation de produits français vers la Chine. Choisir les données d'exportations et non d'importation nous permet d'éviter de prendre en compte les frais de port, de douane, les pertes, et autres biais économiques (Antweiler *et al* 2001). Notons que toutes les données sont en USD courants, ce qui ne règle pas les problèmes d'inflation que nous devons traiter ultérieurement.

⁶² (XXX)_{ij} représente la case de matrice Input Output de l'année XXX ligne i, colonne j.

v- Combustibles utilisés

Nom du combustible	Pays référant l'utilisation	Teneur en carbone ⁶³	Taux d'oxydation ⁶⁴
Charbon brut	Chine - France	26,8	98%
Charbon propre	Chine	26,8	98%
Charbon lavé	Chine	26,8	98%
Coke	Chine - France	29,2	100%
Gaz de four à coke	Chine	12,1	100%
Gaz de four à charbon	Chine	29,2	100%
Autres produits de la cokéfaction	Chine	29,2	100%
Pétrole brut	Chine - France	20	99%
Essence	Chine	18,9	99%
Kérosène	Chine	19,5	99%
Diesel	Chine	20,2	99%
Fioul	Chine - France	21,1	99%
Gaz de pétrole liquéfiés (GPL)	Chine	17,2	99,5%
Gaz de raffinerie	Chine - France	15,7	99,5%
Autres produits pétroliers	Chine - France	20	99%
Gaz naturel	Chine - France	15,3	99,5%
Butane-Propane	France	15,3	99,5%
Fioul Lourd	France	21,1	99%

vi- Tables de correspondances

Les bases de données ainsi extraites doivent enfin correspondre entre elles. Pour cela nous avons pris pour base la classification STAN de l'OCDE dans laquelle nos plus importantes sources de données sont classifiées. Nous exposons dans la suite la classification de chaque base de données en utilisant les tables de correspondances suivantes :

- Guide d'utilisation des nomenclatures d'activités et de produits

<http://www.insee.fr/fr/methodes/nomenclatures/na2003/pdf/guide.pdf>

- Classification de l'OCDE STAN

www.oecd.org/sti/stan-fr/

- Classification de l'Agence Internationale de l'énergie (AIE)

⁶³ GIEC (2006)

⁶⁴ Idem

http://wds.iea.org/wds/pdf/documentation_OECD BAL_2011.pdf

- Correspondances CITI rev 4 vers CITI rev 3.1 vers CITI rev 3

<http://unstats.un.org/unsd/cr/registry/regot.asp?Lg=1>

- Table de correspondance NES > NAF Rev 1

<http://www.pme.gouv.fr/economie/artisanat/Correspondance.pdf>

- Table de correspondance NAF Rev 1 > NACE Rev 1 > CITI Rev 3

http://www.insee.fr/fr/methodes/nomenclatures/na f2003/pdf/CITI_NACE_NAFrev1_2003.pdf

vii- Classification des secteurs

Données de l'OCDE.

Description classification OCDE STAN	CODE CITI Rev3	CODE MEMOIRE
Agriculture, chasse, sylviculture et pêche	01-05	1
Activités extractives	10-14	2
Produit alimentaires, boissons et tabac	15-16	3
Textiles, articles d'habillement, cuir et chaussures	17-19	4
Production de bois, articles en bois et liège	20	5
Pâtes et papiers, articles en papier, imprimerie et édition	21-22	6
Cokéfaction prod. pétroliers et combustibles nucléaires	23	7
Produits chimiques	24	8
Articles en caoutchouc et matières plastiques	25	9
Autres produits minéraux non métalliques	26	10
Produits métallurgiques de base	27	11
Fabrication d'ouvrages en métaux	28	12
Machines et matériel N.C.A. ⁶⁵	29	13
Machines de bureau, comptables, informatiques	30	14
Machines et appareils électriques N.C.A	31	15
Appareils de radio, télévision et communication	32	16
Instr. médicaux, de précision, d'optique et d'horlogerie	33	17
Matériel de transport	34-35	18
Industries manufacturières N.C.A. et récupération	36-37	19
Construction	45	20
Commerce de gros et détail, restaurant et hôtels	50-55	
Transports, entreposage et communication	60-64	

⁶⁵ NCA : Non classé ailleurs

Finance, assurance, immobilier et service aux entreprises	65-74	
Services collectifs sociaux et personnels	75-99	
Electricité, gaz et eau	40-41	21

Données françaises.

Description classification France NES/AIE	CODE NES	CODE CITI rev 4	CODE CITI rev 3	COD E MEM
Agriculture/foresterie (AIE)		01-02	01 à 02	1
Fishing (AIE)		03	01 à 05	
Extraction de minerais métalliques	F11		13	2
Autres industries extractives	F12		14	
Lignite, tourbe, houille	G11		10	
Extraction pétrole	G12		11	
Extraction Uranium	G13		12	3
Food and Tabacco (AIE)		10-12	15 à 16	
Filature et tissage	F21		17.1 17.2 17.3	4
Fabrication de produits textiles	F22		17.4 17.5	
Fabrication d'étoffes et d'articles à maille	F23		17.6 17.7	
Industrie de l'habillement et des fourrures	C11		18	
Industrie du cuir et de la chaussure	C12		19	5
Travail du bois et fabrication d'articles en bois	F31		20	
Fabrication de pâte à papier, de papier et de carton	F32		21.1	6
Fabrication d'articles en papier ou en carton	F33		21.2	
Edition, imprimerie, reproduction	C20		22	7
Raffinage de pétrole	G15		23.1	
Cokéfaction et industrie nucléaire	G14		23.2	8
Industrie chimique minérale	F41		24.1	
Industrie chimique organique	F42		24.1	
Parachimie	F43		24.2	

			24.3 24.6	
Fabrication de fibres artificielles ou synthétiques	F44		24.7	
Industrie pharmaceutique	C31		24.4	
Fabrication de savons, de parfums et de produits d'entretien	C32		24.5	
Industrie du caoutchouc	F45		25.1	9
Transformation des matières plastiques	F46		25.2	
Fabrication de verre et d'articles en verre	F13		26.1	
Fabrication de produits céramiques et de matériaux de construction	F14		26.2 à 26.8	10
Sidérurgie et 1ère transformation de l'acier	F51		27.1 27.2 27.3	11
Production de métaux non ferreux	F52		27.4	
Fonderie	F53		27.5	
Services industriels du travail des métaux	F54		28.4 28.5	
Fabrication de produits métalliques	F55		28.6 28.7	12
Fabrication d'éléments en métal pour la construction	E21		28.1	
Chaudronnerie, fabrication de réservoirs métalliques et de chaudières	E22		28.2 28.3	
Fabrication d'équipements mécaniques	E23		29.1	
Fabrication de machines d'usage général	E24		29.2	
Fabrication de machines agricoles	E25		29.3	13
Fabrication de machines-outils	E26		29.4	
Fabrication d'autres machines d'usage spécifique	E27		29.5	
Fabrication d'armes et de munitions	E28		29.6	
Fabrication d'appareils domestiques	C44		29.7	
Fabrication de machines de bureau, de matériel informatique	E31		30	14
Fabrication de moteurs, génératrices et transformateurs électriques	E32		31.1	15
Fabrication de matériel électrique	F61		31.2 à 31.6	

Fabrication d'appareils d'émission et de transmission	E33		32.2	16
Fabrication d'appareils de réception, enregistrement, reproduction	C45		32.3	
Fabrication de composants électroniques	F62		32.1	
Fabrication de matériel médicochirurgical et d'orthopédie	E34		33.1	17
Fabrication de matériel de mesure et de contrôle	E35		33.2	
Fabrication de matériel optique et photographique, horlogerie	C46		33.4 33.5	
Construction automobile	D01		34.1 34.2	18
Fabrication d'équipements automobiles	D02		34.3	
Construction navale	E11		35.1	
Construction de matériel ferroviaire roulant	E12		35.2	
Construction aéronautique et spatiale	E13		35.3	
Fabrication de cycles, motocycles, matériel de transport	E14		35.4 35.5	
Fabrication de meubles	C41		36.1	19
Bijouterie et fabrication d'instruments de musique	C42		36.2	
Fabrication d'articles de sport, de jeux et industries diverses	C43		36.4 à 36.6	
Construction (AIE)		41-43	45	20
Transports (AIE)		49-51	60 à 62	
Commercial and public service (AIE)		33	Voir annexe 3.1.F pour la liste ¹	
		36-39	41, 90, 23.30, 24.12 ⁶⁶ , 37.10, 45.10 ¹	
		45-47	50-52	
		52	6010 ¹ , 63, 50.20	
		53	64	
		55-56	55	
		58-66	72, 92, 64, 74, 65,	

⁶⁶ Classes dont une ou plusieurs activités économiques ont été double comptées (Pour plus de détail, se référer à l'annexe 3.1.F).

			66, 67	
		68-75	70, 75, 74, 73, 92, 63, 85	
		77-82	71, 65, 74, 92, 63, 64, 75, 52	
		84 (Excluding Class 84.22	75 (Excluding 75.22)	
		85-88	80, 92, 93, 74, 85, 75	
		90-96	92, 75, 91, 65, 72, 52, 93	
		99	99	
Energy industry own use (AIE)		05, 06, 19, 35	10.10, 10.20, 11.10, 23.10, 23.20, 24.11, 40, 15.49 ⁶⁷	21

Données chinoises.

Description classification Chine CITI rev 3	CODE MEMOIRE
Farming, Forestry, Animal Husbandry, Fisherty and Water conservation	1
Mining total	2
Food, Beverage and tobacco processing	3
Textiles	4
Garments and Other Fiber products	
Leather, Furs, Down and Related Products	
Timber Processing, Bamboo, Cane, Palm Fiber and Straw Products	5
Paper-Making and Paper Products,	6
Printing and Record processing	
Petroleum Processing and Coking Products	7
Chemicals and Allied Products,	8
Chemical and Pharmaceutical Products,	
Chemical Fibres	

⁶⁷ Classes dont une ou plusieurs activités économiques ont été double comptées (Pour plus de détail, se référer à l'annexe 3.1.F).

Rubber Products,	9
Plastics Products	
Building Materials and Other Non-Metal Mineral Products	10
Smelting and Pressing of Ferrous Metals,	11
Smelting and Pressing of non-Ferrous Metals	
Metal Products	12
Ordinary Machine Manufacturing	13
Special Purpose Equipment Manufacturing	14
Electric Equipment and Machinery	15
Electric and Telecommunications	16
Instruments, Meters, Cultural and Official Machinery	17
Transportation Equipment Manufacturing	18
Cultural, Educational and Sports Articles	19
Furniture Manufacture	
Other Manufacturing	
Construction	20
Transportation, storage, Postal and Telecommunication Service	
Commerce, Food Services, Material Supply and Marketing	
Non-material Production sectors	
Electric Power, Steam, and Hot Water Production & Supply	21
Gas Production & Supply	
Tap Water Production & Supply	

viii- Liste des doubles comptages français

Note explicative : Le double comptage de certaines activités n'a pas pu être évité dans l'étude, il est dû aux différences existantes entre les classifications CITI rev 4 de l'AIE, et la classification classique CITI rev 3. Dans un souci de transparence nous avons procédé à un relevé systématique de l'ensemble des secteurs doubles comptés. L'annexe 3.1.F se lira de cette manière : Le premier chiffre de la hiérarchie de la classification est appelé **section**, le second **division**, le troisième réfère au **groupe**, et enfin le quatrième chiffre est la **classe** d'industrie. A l'intérieur de chaque classe réside un certain nombre d'activités économiques (Plusieurs dizaines en moyenne). Nos doubles comptages portent essentiellement sur des activités économiques spécifiques à l'intérieur d'une classe.

Notons que les activités doubles comptées sont marginales dans la comptabilisation de l'énergie utilisée par l'industrie. Par exemple la production de composte, ou l'aiguillage ferroviaire, n'émettent pas de CO₂. L'enlèvement des mines est une activité marginale dans l'économie Française qui ne nécessite pas l'utilisation d'énergie. Quant aux activités de réparation elles sont essentiellement des activités de main d'œuvre, elles n'usent donc que très peu d'énergie.

En ce qui concerne les données du secteur de l'énergie Française, extraites de la base de l'AIE. Nous avons soustrait les données NES G15 et G14 des données de l'AIE afin de supprimer les doubles comptages sur les groupes 23.10 et 23.20 du secteur 21. Le secteur énergie devient ainsi compatible avec la classification du mémoire.

Nous avons donc relevé 4 activités et une division double comptés :

- Classe 1549 (CITI rev 3), Manufacture of other food products nec, activité de **"production de glace pour les besoins alimentaires"** consommations énergétiques comptées deux fois, dans les codes 21 et 3 du mémoire
- Classe 2412 (CITI rev 3), Manufacture des fertilisants et produits au nitrogène, activités de **"production de compostes organiques"** consommations énergétiques comptées deux fois, dans les codes 8 et 20 du mémoire.
- Classe 4510 (CITI rev 3), Préparation des sites de construction, activités **"d'enlèvement de mines"** consommations énergétiques comptées deux fois, dans le code 20 du mémoire
- Classe 6010 (CITI rev 3) Transport via railways, activités **"d'aiguillage ferroviaires"** consommations énergétiques comptées deux fois, dans le code 20 du mémoire.
- Division 33 (CITI rev 4) **"réparation et installation d'équipement"**, consommations énergétiques comptées deux fois. (Voir tableau ci-dessous pour une liste complète des activités double comptée de la division 33)

Classe CITI rev 3	Titre activités double comptées (En anglais)
2811	Repair of structural metal products
2812	Repair of tanks, reservoirs and containers of metal
2813	Repair of steam generators
2892	Welding repair
2893	Repair of hand tools and general hardware
2899	Repair of fabricated metal products
2927	Repair of weapons
2929	Repair of moulding boxes and moulds (except ingot moulds)
3420	Repair and maintenance of containers
2911	Repair of engines and turbines (except aircraft, vehicle and cycle)
2912	Repair of pumps, compressors, taps and valves
2913	Repair of bearings, gears, gearing and driving elements
2914	Repair of ovens, furnaces and furnace burners
2915	Repair of lifting and handling equipment (except lifts and escalators)
2919	Repair of other general-purpose machinery
2921	Repair of agricultural and forestry machinery
2922	Repair of machine tools, except electrical welding and soldering equipment
2923	Repair of machinery for metallurgy
2924	Repair of machinery for mining and construction
2925	Repair of machinery for food, beverage and tobacco processing
2926	Repair of machinery for textile, apparel and leather production
2929	Repair of other special purpose machinery (except ultrasonic cleaning machines)
3110	Repair of turbine-generator sets
3230	Repair of dictating machines
3599	Repair of hand trucks and wheelbarrows
3694	Repair of automatic bowling alley equipment
3699	Repair of roundabouts, swings, shooting galleries and other fairground amusements
7250	Repair of office machinery and equipment, except computers and peripheral equipment
3190	Repair of pulse generators
3220	Repair of GPS equipment
3230	Repair of digital cameras
3311	Repair of electro-diagnostic apparatus, X-ray and similar apparatus, irradiation apparatus and tubes (medical and other), hearing aids, pace makers, mirrors, reflectors
3312	Repair of measuring, testing, navigating and control equipment

3313	Repair of industrial process control equipment
3320	Repair of optical instruments and photographic equipment (except household goods)
5260	Repair of cameras (except digital cameras)
2520	Repair of plastic non current carrying wiring devices (junction boxes, face plates etc.)
2922	Repair of electric welding, brazing or soldering equipment
2929	Repair of ultrasonic cleaning machines (except laboratory and dental)
3110	Repair of electric motors, generators and transformers, battery chargers etc.
3120	Repair of electricity distribution and control apparatus
3130	Repair of electric and electronic wires and cables (except computer cables etc.)
3140	Repair of accumulators etc.
3150	Repair of electric lighting equipment
3190	Repair of other electrical equipment
3210	Repair of solid-state fuel cells, power supplies; non-electronic electric components, such as non-electronic capacitors, resistors etc. (e.g. power capacitors)
3511	Repair and maintenance of ships
3512	Repair and maintenance of pleasure boats
3520	Repair of railway cars etc.
3530	Repair and maintenance of aircraft
3599	Repair of animal-drawn vehicles
6303	Maintenance and minor repair of rolling stock
1721	Repair of canvas products, tarpaulin, fertilizer and chemical storage bags
1723	Repair of ropes, fishing nets, including mending
2023	Repair or reconditioning of wooden pallets, shipping drums or barrels, and similar items
2029	Repair of other wood products, except household goods (e.g. wooden spools and similar parts of textile machinery)
2519	Repair of rubber products (except tyres)
2520	Repair of plastic products
2610	Repair of glass and glass products
2699	Repair of millstones, grindstones, polishing stones etc.
3311	Repair of orthopedic and prosthetic devices, gas masks
3312	Repair of laboratory sterilizers and laboratory type distilling apparatus
3330	Repair of parking meters, time clocks, time/date stamps, time locks, and similar timing devices
3692	Restoring of organs and other historical musical instruments
3694	Repair of pinball machines and other coin-operated games
2813	Installation of steam generators, nuclear reactors

2911	Installation of engines and turbines
2912	Installation of industrial machinery-type pumps
2914	Installation of ovens and furnaces
2915	Installation of lifting and handling equipment
2919	Installation of other general-purpose machinery
2921	Installation of agricultural machinery
2922	Installation of machine tools (e.g. hydraulic presses, draw-benches)
2923	Installation of machinery for metallurgy
2924	Installation of machinery for mining and construction (e.g. continuous action elevators, tunneling machines)
2925	Installation of machinery for food beverage and tobacco processing
2926	Installation of machinery for textile, apparel and leather production
2929	Installation of other special purpose machinery
3000	Installation of mainframes and similar computers, other office machinery
3110	Installation of electric motors, generators and transformers
3220	Installation of communication equipment
3311	Installation of X-ray machines etc.
3313	Installation of industrial process control equipment
4540	Installation of bowling alley equipment

3.2 Intensité totale sur différentes années

i- Chine

KtCO ₂ / M\$	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	Évolution 96-03
Agriculture	1,9648	1,7864	1,6164	1,5329	1,4454	1,2259	1,1142	1,0649	-46%
Extraction	5,1267	4,6601	5,1464	3,5776	3,2513	2,7374	2,4496	2,4707	-52%
Agro-alimentaire	2,6358	2,2835	2,0473	1,8643	1,6516	1,4287	1,3195	1,2540	-52%
Textiles	2,9947	2,5301	2,1700	1,9264	1,7655	1,5447	1,4674	1,5200	-49%
Produits du bois	3,8022	3,2332	2,7908	2,4145	2,1652	1,7514	1,5382	1,5648	-59%
Papier	4,4340	3,7122	3,1821	2,8138	2,6417	2,2414	2,0492	2,0646	-53%
Produits pétroliers	4,4457	4,8981	4,6666	3,6211	3,2676	2,9025	2,7736	2,7647	-38%
Produits chimiques	8,4598	6,4117	5,3230	4,5587	4,1126	3,2633	2,9383	2,8976	-66%
Plastique	4,2430	3,4744	2,9688	2,5931	2,3678	2,1220	2,0395	2,1909	-48%
Produits minéraux	7,9190	7,4582	6,9930	6,6070	6,2617	5,6533	5,5349	6,1973	-22%
Sidérurgie	10,6936	9,7353	8,6530	7,7748	7,1059	5,5423	4,8939	5,0611	-53%
Produits en métaux	5,8386	5,2975	4,7678	4,3506	4,0326	3,2316	2,9211	2,9914	-49%
Machines & matériel	4,3698	3,9321	3,4379	3,1310	2,8774	2,3338	2,1034	2,1679	-50%
Machines informatiques	5,0214	3,2548	3,0333	2,0908	1,6955	1,3618	1,2223	1,2596	-75%

Machines électriques	3,8946	3,5226	3,8565	2,8268	2,5986	2,0610	1,8350	1,8088	-54%
Appareils communication	2,7772	2,3011	2,0226	1,7066	1,5205	1,2736	1,2061	1,0680	-62%
Instruments précision	3,8290	3,3120	4,2981	2,6301	2,3885	1,8180	1,6066	1,5294	-60%
Matériel de Transport	3,9803	3,5435	4,1510	2,7081	2,4508	2,1007	1,9473	1,9544	-51%
Autres Manufactures	3,9507	3,6719	3,2146	3,1748	3,1034	2,3633	2,0086	1,9065	-52%
Services	3,6775	3,3340	3,1185	2,8358	2,6413	2,0835	1,8356	1,8103	-51%
Secteur énergie	5,6542	5,2640	4,3023	3,7765	3,3237	2,7343	2,5195	2,6678	-53%

ii- France

KtCO ₂ / M\$	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	Évolution 96-03
Agriculture	0,2587	0,2676	0,2869	0,3006	0,3110	0,2921	0,2655	0,2451	-5%
Extraction	0,2476	0,2505	0,2827	0,2906	0,2420	0,2580	0,2015	0,1893	-24%
Agro-alimentaire	0,2397	0,2502	0,2732	0,2977	0,3095	0,2861	0,2592	0,2366	-1%
Textiles	0,1646	0,1774	0,1753	0,1809	0,1564	0,1604	0,1396	0,1311	-20%
Bois et articles en	0,1810	0,1760	0,2008	0,2120	0,2015	0,1970	0,1665	0,1533	-15%
Papier, imprimerie,	0,2324	0,2389	0,2669	0,2692	0,2678	0,2356	0,2114	0,1968	-15%
Combustibles	0,7606	0,8113	0,7120	0,6728	0,6449	0,6088	0,5252	0,4402	-42%
Produits chimiques	0,4595	0,4640	0,4984	0,4955	0,4936	0,4366	0,3743	0,3373	-27%
Plastiques	0,2057	0,1919	0,2176	0,2130	0,1944	0,1786	0,1542	0,1388	-33%
Minéraux non	0,6099	0,6200	0,6745	0,6818	0,6982	0,6227	0,2945	0,2642	-57%
Sidérurgie	1,1468	1,2246	1,2782	1,3639	1,3757	1,1678	1,0805	0,9687	-16%
Ouvrages en	0,2030	0,2115	0,2254	0,2333	0,2219	0,2068	0,1826	0,1670	-18%
Machines	0,1783	0,1803	0,1900	0,1933	0,1828	0,1662	0,1472	0,1345	-25%
Machines	0,0728	0,0819	0,0980	0,1134	0,1231	0,1121	0,1002	0,0936	29%
Machines	0,1863	0,1827	0,1912	0,1924	0,1779	0,1605	0,1322	0,1336	-28%
Matériel	0,1363	0,1357	0,1415	0,1425	0,1336	0,1250	0,1252	0,1057	-22%
Instruments de	0,1407	0,1396	0,1462	0,1469	0,1364	0,1254	0,1107	0,1020	-27%
Matériel de	0,1719	0,1763	0,1885	0,1964	0,1918	0,1716	0,1509	0,1379	-20%
Autres	0,1815	0,1821	0,1913	0,1983	0,1853	0,1653	0,1382	0,1219	-33%
Services	0,2529	0,2551	0,2705	0,2784	0,2654	0,2391	0,2120	0,1934	-24%
Secteur énergie	0,5538	0,5770	0,6367	0,6714	0,7066	0,6018	0,4894	0,4476	-19%

iii- Rapport Chine sur France

Secteur (En %)	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	Évolution 96-03
Agriculture	8	7	6	5	5	4	4	4	-43%
Extraction	21	19	18	12	13	11	12	13	-37%
Agro-alimentaire	11	9	7	6	5	5	5	5	-52%
Textiles	18	14	12	11	11	10	11	12	-36%
Bois et articles en bois	21	18	14	11	11	9	9	10	-51%
Papier, imprimerie,	19	16	12	10	10	10	10	10	-45%
Combustibles	6	6	7	5	5	5	5	6	7%

Produits chimiques	18	14	11	9	8	7	8	9	-53%
Plastic & Caoutchouc	21	18	14	12	12	12	13	16	-23%
Minéraux non	13	12	10	10	9	9	19	23	81%
Sidérurgie	9	8	7	6	5	5	5	5	-44%
Ouvrages en métaux	29	25	21	19	18	16	16	18	-38%
Machines	25	22	18	16	16	14	14	16	-34%
Machines	69	40	31	18	14	12	12	13	-80%
Machines électriques	21	19	20	15	15	13	14	14	-35%
Matériel	20	17	14	12	11	10	10	10	-50%
Instruments de	27	24	29	18	18	14	15	15	-45%
Matériel de transport	23	20	22	14	13	12	13	14	-39%
Autres manufactures	22	20	17	16	17	14	15	16	-28%

3.3 Balances

i- balance commerciale française (commerce avec la Chine)

Secteur (Millions de \$)	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Agriculture	2	-7	66	146	121	49	32	63
Extraction	-19	-26	-26	-22	-8	-19	-25	-20
Agro-alimentaire	-65	-24	-40	-22	-3	-24	20	19
Textiles	-515	-602	-689	-731	-817	-843	-961	-1 179
Bois et articles en bois	-40	-28	-24	-22	-27	-37	-44	-64
Papier, imprimerie, édition	17	49	23	19	17	19	27	55
Combustibles énergétiques	-17	-52	-63	-45	-56	13	32	-86
Produits chimiques	184	217	184	123	160	100	161	126
Plastic & Caoutchouc	-75	-93	-95	-98	-117	-113	-109	-109
Minéraux non métalliques	1	5	-17	-17	1	18	12	2
Sidérurgie	50	99	114	101	75	57	75	156
Ouvrages en métaux	5	-10	-27	128	6	-68	-78	-114
Machines	607	377	277	168	110	201	309	305
Machines informatiques	-54	-129	-226	-202	-235	-263	-357	-2 077
Machines électriques	118	90	103	142	95	38	109	112
Matériel communication	-52	-39	119	39	7	143	47	-246
Instruments de précision	11	-8	-19	6	-8	17	-2	10
Matériel de transport	645	1 602	1 172	980	278	206	213	1 201
Autres manufactures	-218	-247	-262	-256	-301	-295	-320	-368
TOTAL	587	1 176	570	437	-700	-802	-858	-2 214

ii- BEET française

Secteur (KtCO ₂)	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Agriculture	51	58	39	-9	-10	14	15	12

Extraction	116	140	156	114	59	63	67	58
Agro-alimentaire	303	212	203	151	143	134	83	101
Textiles	1 627	1 601	1 600	1 519	1 581	1 418	1 534	1 971
Bois et articles en bois	156	112	93	86	98	89	84	108
Papier, imprimerie, édition	30	26	25	35	42	37	27	28
Combustibles énergétiques	84	268	317	187	191	100	73	282
Produits chimiques	932	691	632	524	505	544	491	769
Plastic & Caoutchouc	384	386	341	321	364	313	318	412
Minéraux non métalliques	220	232	290	288	254	215	245	368
Sidérurgie	-13	-76	-75	-78	-29	-2	-10	-41
Ouvrages en métaux	457	478	518	450	510	446	465	641
Machines	432	575	614	724	861	673	716	1 133
Machines informatiques	443	505	756	479	446	390	464	2 661
Machines électriques	254	394	526	390	565	560	528	667
Matériel communication	417	507	499	476	688	439	487	886
Instruments de précision	280	272	397	238	265	198	203	272
Matériel de transport	38	-190	226	68	500	298	204	207
Autres manufactures	883	946	878	878	1 031	765	722	859
TOTAL	7 093	7 135	8 033	6 843	8 064	6 695	6 717	11 394

3.4 Relation entre commerce et environnement de 1996 à 2003

Année	Régression du nuage de points	R ²	P-value du coefficient	Moyenne ordonnée	Moyenne abscisse
1996	y=1,3505x+20,93	0,4%	0,795	21,1	0,108
1997	y=1,8007x+17,03	2,1%	0,555	17,2	0,111
1998	y=1,7168x+15,08	2,0%	0,560	15,3	0,121
1999	y=1,2263x+11,83	2,5%	0,515	11,9	0,055
2000	y=2,3005x+11,135	7,3%	0,261	11,4	0,095
2001	y=2,9434x+9,79	15,5%	0,095*	10,1	0,102
2002	y=2,8939x+10,73	12,4%	0,138	11,0	0,086
2003	y=1,7336x+11,89	3,8%	0,421	12,1	0,130

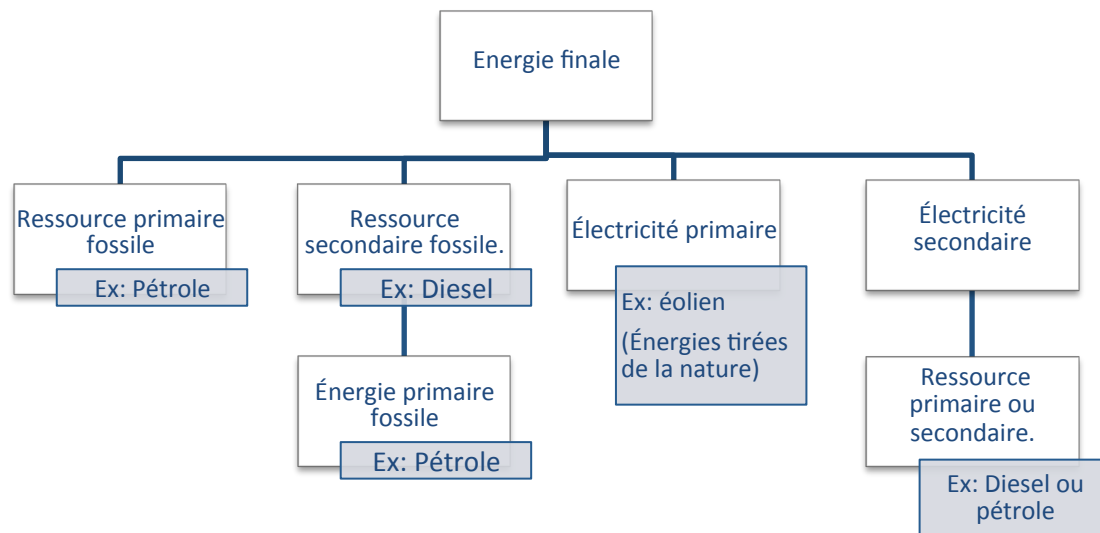
4 Annexes du chapitre 4

4.1 Traitement des données

Nous avons discuté dans le chapitre précédant de la collecte des données. Cette seconde partie est

donc consacrée au traitement des données. Dans ce chapitre nous voulons comptabiliser les changements d'émission de CO₂ dû à la modification de la structure d'input en énergie. Hors, notre matrice d'input en énergie ne se prête pas à ce type d'analyse puisqu'elle regroupe la consommation d'électricité secondaire au sein du secteur de production énergétique.

Figure 10, Distribution du système énergétique



Nous divisons notre système énergétique en quatre catégories d'énergie. La production d'énergie sous forme **électrique**, et la production d'énergie sous forme de **chaleur** et l'énergie **primaire**⁶⁸ et **secondaire**⁶⁹.

Précisons :

- La transformation des ressources primaires en ressources secondaires nécessite plus d'inputs primaires, qu'elle ne produira d'output secondaires. On pourrait alors comptabiliser à tort des émissions de CO₂ provenant des inputs qui ne sont pas brûlés, mais seulement transformés en output. Notre étude ne comptabilise que les combustibles qui sont **réellement brûlés** pour produire l'output.

⁶⁸ Énergie primaire : énergie tirée des ressources extraites à l'état brut, ou directement tirée de la nature.

⁶⁹ Énergie secondaire : énergie tirée de ressources ayant subi une transformation.

- L'électricité primaire est directement tirée de la nature, exception faite du combustible nucléaire qui est rangé par convention dans la catégorie des énergies électriques primaires. Au même titre que les énergies électriques primaires, l'énergie nucléaire n'émet pas directement de CO₂.

Nous souhaitons alors transformer notre matrice d'input en énergie de façon à distribuer la consommation des combustibles fossiles utilisés pour produire l'énergie électrique sur chaque secteur de l'économie. Il existe à notre connaissance trois approches existante pour traiter la comptabilisation de l'énergie électrique : **i) Modèle classique ii) Principe de la teneur en carbone iii) La méthode hybride.**

i) Le modèle classique

Le modèle classique intègre le CO₂ émis par l'input du secteur électrique grâce aux TES. Les émissions de CO₂ sont donc distribuées de façon classique en fonction des achats d'électricité par les secteurs.

La principale critique de cette méthode, est que le tarif du kilo-Watt-heure⁷⁰ (kWh) diffère d'un pays à l'autre, et n'est pas toujours représentatif de la consommation d'électricité de chaque secteur. Cette différence va donc affecter la distribution des émissions via le TES, et la consommation de CO₂ de certains secteur sera sous-évaluée, alors que pour d'autres elle sera surévaluée.

ii) Principe de la teneur en Carbone du kWh

Nous pouvons aussi affecter une valeur de teneur en carbone à chaque kWh d'électricité consommé par les secteurs de l'économie. La valeur de teneur en carbone du kWh est définie par la division de l'ensemble des émissions de CO₂ des inputs du secteur électrique, par l'ensemble des kWh de son output. Mais, avec une telle construction il n'est pas possible d'analyser l'impact de changements dans la structure des inputs sur les émissions de CO₂. En effet, l'ensemble des combustibles utilisés pour créer l'électricité secondaire sont agrégés dans la teneur en carbone, et sont donc indissociables.

⁷⁰ Le kWh est l'énergie consommée par un appareil de 1000 watts, pendant une utilisation pleine d'une heure.

iii) Le modèle hybride

Dans cette étude nous avons choisi d'utiliser un modèle hybride, qui distribue la consommation en combustible de l'électricité à chaque secteur en fonction de sa consommation de kWh.

$$x_{i,c} = \frac{TE_c}{\frac{E_i}{\sum_i^n E_i}}$$

$x_{i,c}$ représente le volume de combustible c utilisé par le secteur i pour produire de l'électricité; TE_c est la quantité du combustible c utilisé pour produire l'électricité à l'échelle du pays; E_i est la quantité de kWh utilisée par le secteur i . n est le nombre de secteur de l'économie.

Notons que le modèle hybride ne distribue que les combustibles utilisés pour produire de l'électricité. Les consommations de fonctionnement des centrales électriques, soit l'éclairage, le chauffage, l'allumage des turbines, la gestion informatique, etc. est comptabilisée dans la consommation du secteur de l'énergie telle que définie par la classification internationale CITI.

4.2 Détail des énergies utilisées dans l'étude.

Nom du combustible	Pays référant l'utilisation	Type d'énergie	Source primaire	Ensemble
Électricité	Chine France	Primaire	Éolien	NR
			Géothermal	NR
			Hydraulique	NR
			Nucléaire	NR
			Solaire	NR
		Secondaire	Fioul	NE
			Charbon	NE
			Gaz naturel	NE
			Pétrole brut	NE
			Essence	NE
			Diesel	NE
			GPL	NE
			Gaz de raffinerie	NE

			Coke	NE
			Gaz de coke	NE
Charbon brut	Chine France	Primaire	N.A.	NC
Charbon propre	Chine	Secondaire	Charbon	NC
Charbon lavé	Chine	Secondaire	Charbon	NC
Coke	Chine France	Secondaire	Charbon	NC
Gaz de four à coke	Chine	Secondaire	Charbon	NC
Gaz de four à charbon	Chine	Secondaire	Charbon	NC
Autres produits cokéfiés	Chine	Secondaire	Charbon	NC
Pétrole brut	Chine France	Primaire	N.A.	NC
Essence	Chine	Secondaire	Pétrole	NC
Kérosène	Chine	Secondaire	Pétrole	NC
Diesel	Chine	Secondaire	Pétrole	NC
Fioul	Chine France	Secondaire	Pétrole	NC
GPL	Chine	Secondaire	Pétrole	NC
Gaz de raffinerie	Chine France	Secondaire	Gaz	NC
Autres produits pétroliers	Chine France	Secondaire	Pétrole	NC
Gaz Naturel	Chine France	Primaire	N.A.	NC
Butane-Propane	France	Secondaire	Gaz	NC
Fioul Lourd	France	Secondaire	Pétrole	NC

4.3 Détail équations du chapitre 4.

i- Mix énergétique.

$$\frac{(S_{j=i,t+1} - S_{j=i,t})}{\ln S_{j=i,t+1} - \ln S_{j=i,t}} \times \ln \left(\frac{\left\{ \frac{\sum_{cc=1}^{nc} \frac{44}{12} o_{cc} t_{cc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} \frac{44}{12} o_{ce} t_{ce} f_{ce} x_{ce}^i}{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i} \right\}_{t+1}}{\left\{ \frac{\sum_{cc=1}^{nc} \frac{44}{12} o_{cc} t_{cc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} \frac{44}{12} o_{ce} t_{ce} f_{ce} x_{ce}^i}{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i} \right\}_t} \right)$$

Membre d'intérêt :

$$\frac{\sum_{cc=1}^{nc} \frac{44}{12} o_{cc} t_{cc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} \frac{44}{12} o_{ce} t_{ce} f_{ce} x_{ce}^i}{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i}$$

Le membre d'intérêt représente le rapport entre la quantité totale de CO₂ émise par la production

du secteur i , sur la quantité d'inputs en énergie polluante utilisée par ce secteur. Elle représente plus clairement la quantité de CO_2 moyenne libérée par l'utilisation d'une unité d'énergie. C'est une représentation du mix énergétique.

- Si des énergies plus polluantes sont utilisées dans le mix énergétique, la moyenne augmentera d'une année sur l'autre, traduisant une augmentation du CO_2 incorporé.
- À l'opposé si pour une même demande en énergie, l'entreprise décide d'utiliser un combustible moins polluant, la valeur baissera, et nous pourrions capter la différence d'émission de CO_2 associé au changement de combustible.

Plusieurs critiques peuvent être formulées :

- La valeur ne nous informe pas sur le combustible qui a été substitué, ni quel nouveau combustible a été choisi.
- Aussi, à cause du rendement des centrales thermiques, les combustibles utilisés pour produire l'électricité secondaire sont comparativement plus polluants que ceux utilisés directement dans la production. L'équation peut donc aussi représenter une augmentation de l'utilisation de l'électricité dans le mix en énergie.

(Pour plus de détail sur les ensembles énergétiques ne , nc , nr , se reporter à l'annexe X 4.2)

ii- Changement technique des centrales.

$$= \frac{(S_{j=i,t+1} - S_{j=i,t})}{\ln S_{j=i,t+1} - \ln S_{j=i,t}} \times \ln \left(\frac{\left\{ \frac{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i}{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \times \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i} \right\}_{t+1}}{\left\{ \frac{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i}{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \times \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i} \right\}_t} \right)$$

Membre d'intérêt

$$\frac{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i}{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \times \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i}$$

Nous savons que l'énergie produite par la centrale électrique est soumise à un rendement. Le membre d'intérêt nous renseigne donc sur les différences de technologie, pour la production de l'énergie électrique secondaire, d'une période sur l'autre.

Remarque :

- La variation du rendement r des centrales n'est pas le seul facteur capté par l'équation. L'équation capte aussi la variation du rapport entre ressources fossiles brutes utilisées, et énergie électrique secondaire utilisée.

iii- Énergies propres.

$$= \frac{(S_{j=i,t+1} - S_{j=i,t})}{\ln S_{j=i,t+1} - \ln S_{j=i,t}} \times \ln \left(\frac{\left\{ \frac{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \times \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i}{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \times \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i + \sum_{rr=1}^{nr} f_{rr} x_{rr}^i} \right\}_{t+1}}{\left\{ \frac{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \times \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i}{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \times \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i + \sum_{rr=1}^{nr} f_{rr} x_{rr}^i} \right\}_t} \right)$$

Membre d'intérêt

$$\frac{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \times \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i}{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \times \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i + \sum_{rr=1}^{nr} f_{rr} x_{rr}^i}$$

Le ratio du membre d'intérêt diminue avec l'augmentation de la part des énergies propres, au contraire il augmente à fur et à mesure que les énergies propres sont marginalisées. Nous pouvons alors capter l'augmentation ou la diminution des émissions de CO₂ résultant d'une augmentation du parc d'énergie propre dans le mix énergétique.

iv- Changement technique.

$$= \frac{(S_{j=i,t+1} - S_{j=i,t})}{\ln S_{j=i,t+1} - \ln S_{j=i,t}} \times \ln \left(\frac{\left\{ \frac{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \times \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i + \sum_{rr=1}^{nr} f_{rr} x_{rr}^i}{D_p Y_i} \right\}_{t+1}}{\left\{ \frac{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \times \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i + \sum_{rr=1}^{nr} f_{rr} x_{rr}^i}{D_p Y_i} \right\}_t} \right)$$

Membre d'intérêt :

$$\frac{\sum_{cc=1}^{nc} f_{cc} x_{cc}^i + r \times \sum_{ce=1}^{ne} f_{ce} x_{ce}^i + \sum_{rr=1}^{nr} f_{rr} x_{rr}^i}{D_p Y_i}$$

Le membre d'intérêt représente la quantité totale d'output en énergie utilisée par le secteur i , sur son output financier. C'est la représentation parfaite de la productivité énergétique. Si le secteur i utilise une grande quantité d'énergie pour produire son output, cette composante sera très élevée.

Si d'une année sur l'autre la productivité par unité d'énergie s'améliore, la composante réduira, et nous pourrons capter la réduction de l'émission de CO₂ associée.

vi- Variation de l'autoconsommation

$$= \frac{(S_{j=i,t+1} - S_{j=i,t})}{Ln S_{j=i,t+1} - Ln S_{j=i,t}} \times \ln \left(\frac{b_{ji,t+1}}{b_{ji,t}} \right)$$

Membre d'intérêt

$$\frac{b_{ji,t+1}}{b_{ji,t}}$$

D'une année sur l'autre si l'autoconsommation augmente le membre d'intérêt captera l'augmentation de CO₂ en découlant.

vi- Les externalités techniques & variation des consommations intermédiaires

$$= \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{(S_{ji,t+1} - S_{ji,t})}{Ln S_{ji,t+1} - Ln S_{ji,t}} \times \ln \left(\frac{\left\{ \frac{\sum_{cc=1}^{nc} \frac{44}{12} o_{cc} t_{cc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} \frac{44}{12} o_{ce} t_{ce} f_{ce} x_{ce}^i}{D_p Y_i} \right\}_{t+1}}{\left\{ \frac{\sum_{cc=1}^{nc} \frac{44}{12} o_{cc} t_{cc} f_{cc} x_{cc}^i + \sum_{ce=1}^{ne} \frac{44}{12} o_{ce} t_{ce} f_{ce} x_{ce}^i}{D_p Y_i} \right\}_t} \right)$$

Membre d'intérêt :

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{(S_{ji,t+1} - S_{ji,t})}{Ln S_{ji,t+1} - Ln S_{ji,t}} \ln \left(\frac{b_{ji,t+1}}{b_{ji,t}} \right)$$

La littérature utilise les propriétés du TES pour extraire les changements dans les émissions incorporées au commerce qui sont dus aux externalités (Peters *et al* 2007).

- La matrice inverse des coefficients de Leontief, L, présente dans sa première diagonale l'autoconsommation de chaque secteur. Dans le cas des émissions de CO₂ incorporées au commerce, les éléments de la première diagonale représentent donc le CO₂ émis par le secteur i, et incorporé dans son propre output.
- Les autres éléments de la matrice des coefficients inverses de Leontief représentent l'émission de CO₂ des autres secteurs incorporés dans l'output du secteur i.

Le tableau ci-dessous résume la construction

Leontief	Agriculture	Industrie	Services
Agriculture	<i>Variation interne</i>	<i>Externalités</i>	<i>Externalités</i>
Industrie	<i>Externalités</i>	<i>Variation interne</i>	<i>Externalités</i>
Service	<i>Externalités</i>	<i>Externalités</i>	<i>Variation interne</i>
Total	<i>Émissions incorporées à la demande finale agricole</i>	<i>Émissions incorporées à la demande finale industrielle</i>	<i>Émissions incorporées à la demande finale des services</i>

vii- Effet d'échelle & effet de composition

$$\sum_{j=1}^n \frac{(S_{ji,t+1} - S_{ji,t})}{\ln S_{ji,t+1} - \ln S_{ji,t}} \ln \left(\frac{\left\{ \frac{X_i}{X} \right\}_{t+1}}{\left\{ \frac{X_i}{X} \right\}_t} \right) + \sum_{j=1}^n \frac{(S_{ji,t+1} - S_{ji,t})}{\ln S_{ji,t+1} - \ln S_{ji,t}} \ln \left(\frac{X_{t+1}}{X_t} \right)$$

Membre d'intérêt :

$$X_i = X \times \frac{X_i}{X}$$

La composante, X_i/X , représente le poids du secteur i dans les exportations totales. La variation de sa valeur affecte les émissions incorporées au commerce, car chaque secteur dispose d'une intensité d'émission de CO_2 qui lui est propre. De fait, l'augmentation du poids d'un secteur hautement polluant dans les exportations totales, affecte d'avantage les émissions de gaz à effet de serre, que l'augmentation du poids d'un secteur de faible intensité carbone. Nous appelons cet effet, l'effet de composition du commerce. Les changements dans l'émission de CO_2 dus à une modification de la composition du commerce d'une année sur l'autre seront captés par le modèle.

Notons que cet effet est global, et que nous ne pouvons pas l'identifier par secteur. Quelque soit l'intensité d'émission de CO_2 du secteur i , si X_i/X baisse, la formule mathématique enregistrera une baisse, si X_i/X augmente la formule enregistrera une hausse. Par exemple, nos mesures peuvent révéler que la hausse de la part relative des exportations du secteur le moins intensif en carbone augmente l'effet de composition enregistré pour le secteur i . En fait, cette hausse affecte

à la baisse les mesures enregistrée pour tous les autres secteurs, si bien que la somme de toutes les données présentera un effet de composition négatif.

4.4 Détail des trois effets

i- Exportations chinoises vers la France

CHINE	Exportations (M\$)	MtCO2 incorporées	A- Technique (KtCO2)	B-Composition (KtCO2)	C- Échelle (KtCO2)	A+B+C
1996	1907	7,688	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
1997	2336	7,990	-1269 (21%)	-8 (0%)	1580 (-17%)	302 (4%)
1998	2830	8,929	-2051 (42%)	87 (1%)	3205 (-27%)	1241 (16%)
1999	2929	7,740	-3187 (43%)	-29 (0%)	3268 (-41%)	052 (1%)
2000	3715	8,857	-4071 (70%)	-141 (-2%)	5381 (-53%)	1169 (15%)
2001	3700	7,385	-5188 (64%)	-13 (0%)	4898 (-67%)	-303 (-4%)
2002	4087	7,404	-5867 (73%)	-44 (-1%)	5627 (-76%)	-284 (-4%)
2003	7330	12,347	-7768 (164%)	-220 (-3%)	12646 (-101%)	4659 (61%)

ii- Exportations françaises vers la Chine

FRANCE	Exportation (M\$)	MtCO2 incorporées	A- Technique (KtCO2)	B-Composition (KtCO2)	C- Échelle (KtCO2)	A+B+C
1996	2494	,595	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
1997	3512	,855	16 (+3%)	3 (0%)	242 (41%)	260 (4%)
1998	3400	,896	60 (+10%)	18 (+3%)	223 (38%)	301 (16%)
1999	3366	,897	79 (+13%)	8 (+1%)	214 (36%)	302 (1%)
2000	3015	,793	55 (+9%)	15 (+3%)	127 (21%)	198 (15%)
2001	2898	,690	-21 (-4%)	23 (+4%)	93 (16%)	95 (-4%)
2002	3229	,687	-108 (-18%)	41 (+7%)	159 (27%)	92 (-4%)
2003	5116	,953	-191 (-32%)	16 (+3%)	533 (90%)	358 (61%)

4.5 Décomposition structurelle de l'effet technique.

i- Effet technique de Chine 1996-2003

KtCO ₂ / M\$	Intensité totale 1996	Changement technologique	Changement combustible	Externalité technologique	Externalité combustible	Variation autoconsommation	Variation consommation intermédiaire	Variation totale	Intensité totale 2003
Agriculture	2,0	-0,18	-0,01	0,05	-0,826	0,00	0,06	-0,90	1,1
Extraction	5,1	-1,62	-0,04	0,10	-1,088	-0,03	0,02	-2,65	2,5
Agro-alimentaire	2,6	-0,61	0,06	0,06	-0,911	0,02	0,00	-1,38	1,3
Textiles	3,0	-0,53	0,12	0,08	-1,275	-0,02	0,14	-1,47	1,5
Produits du bois	3,8	-0,92	0,07	0,11	-1,547	0,05	0,00	-2,23	1,6
Pâtes, papier	4,4	-1,58	0,22	0,10	-1,396	0,04	0,24	-2,36	2,1
Produits NRJ	4,4	-0,32	0,06	0,06	-1,624	0,02	0,11	-1,68	2,8
Chimie	8,5	-5,14	0,21	0,09	-1,002	0,38	-0,10	-5,56	2,9
Articles en plastic	4,2	-0,53	0,19	0,14	-2,114	-0,04	0,29	-2,05	2,2
Prod. minéraux	7,9	-0,17	0,42	0,12	-1,667	-0,53	0,11	-1,72	6,2
Sidérurgie	10,7	-4,87	0,39	0,08	-1,094	0,10	-0,24	-5,63	5,1
Ouvrages en métaux	5,8	-0,39	0,19	0,22	-2,829	0,01	-0,04	-2,84	3,0
Machines nca	4,4	-0,27	0,00	0,18	-2,232	-0,02	0,15	-2,20	2,2
Mach. informat.	5,0	-1,76	-0,01	0,12	-1,469	0,05	-0,70	-3,76	1,3
Mach. électriques	3,9	-0,26	0,00	0,17	-2,027	0,00	0,04	-2,08	1,8
Mat. de com.	2,8	-0,15	0,00	0,10	-1,300	0,00	-0,36	-1,70	1,1
Inst.de précision	3,8	-0,46	-0,01	0,14	-1,684	-0,01	-0,28	-2,29	1,5
Mat. de Transport	4,0	-0,45	-0,01	0,15	-1,886	-0,01	0,17	-2,02	2,0
Autre manuf.	4,0	-0,47	0,17	0,13	-1,638	-0,02	-0,22	-2,04	1,9
Services	3,7	-0,34	0,00	0,13	-1,297	0,01	-0,37	-1,86	1,8
Energie	5,7	-2,32	0,27	0,05	-1,113	0,11	0,02	-2,98	2,7

i- Effet technique de France 1996-2003

KtCO ₂ / M\$	Intensité totale 1996	Changement technologique	Changement combustible	Énergies propres	Rendement des centrales	Externalités (Combustible + technologie)	Variation autoconsommation	Variation consommation intermédiaire	Variation totale	Intensité totale 2003
Agriculture	0,259	0,006	0,000	-0,003	-0,001	-0,027	0,007	0,004	-0,014	0,245
Extraction	0,248	-0,006	-0,017	-0,008	-0,001	-0,035	0,000	0,008	-0,058	0,189
Agro-alimentaire	0,240	0,017	0,001	-0,001	-0,002	-0,033	-0,001	0,016	-0,003	0,237
Textiles	0,165	-0,004	0,002	-0,005	0,000	-0,025	-0,002	0,001	-0,034	0,131
Produits du bois	0,181	-0,012	0,002	0,002	0,000	-0,029	-0,002	0,011	-0,028	0,153
Pâtes, papier	0,232	0,016	-0,023	-0,002	0,000	-0,031	-0,009	0,014	-0,036	0,197
Produits NRJ	0,761	-0,284	0,003	0,000	0,000	-0,016	0,003	-0,027	-0,320	0,440
Chimie	0,459	-0,047	-0,020	-0,007	0,000	-0,043	-0,013	0,007	-0,122	0,337
Articles en plastic	0,206	-0,003	-0,003	-0,008	0,000	-0,034	0,000	-0,018	-0,067	0,139
Prod. minéraux	0,610	-0,328	0,019	-0,017	0,000	-0,033	0,002	0,012	-0,346	0,264
Sidérurgie	1,147	-0,052	0,005	-0,019	0,000	-0,045	-0,077	0,010	-0,178	0,969
Ouvrages en métaux	0,203	0,002	-0,001	-0,004	0,000	-0,029	0,000	-0,005	-0,036	0,167
Machines nca	0,178	-0,002	0,000	-0,003	0,000	-0,030	0,000	-0,009	-0,044	0,135
Mach. informat.	0,073	0,005	0,000	-0,001	0,000	-0,022	0,000	0,040	0,021	0,094
Mach. électriques	0,186	-0,003	0,000	-0,005	0,000	-0,029	0,000	-0,017	-0,053	0,134
Mat. de com.	0,136	0,000	0,000	-0,003	0,000	-0,031	0,000	0,003	-0,031	0,106
Inst.de précision	0,141	0,000	0,001	-0,002	0,000	-0,030	0,000	-0,007	-0,039	0,102
Mat. de Transport	0,172	-0,003	-0,002	-0,003	0,000	-0,031	0,000	0,006	-0,034	0,138
Autre manuf.	0,182	-0,004	0,002	-0,002	0,000	-0,032	0,000	-0,023	-0,060	0,122
Services	0,253	-0,043	-0,007	-0,003	0,000	-0,013	0,009	-0,003	-0,059	0,193
Energie	0,554	-0,104	0,021	-0,037	0,000	-0,035	0,041	0,007	-0,106	0,448

5 Annexes du chapitre 5**5.1 Preuve de la décomposition équations (13) et (14)**

Lorsque C_i passe de positif à négatif d'une période t à $t+1$, nous nous inspirons d'Ang (2007a, 2007b) pour fractionner les équations de décomposition en deux périodes afin de contrer les logarithmes négatifs et les valeurs égales à zéro :

$$\Delta C_i = C_i^{t+1} - C_i^t = \underbrace{C_i^{t+1} - C_i^0}_{\substack{\text{Période réduction d'émission} \\ C_i^0 \rightarrow 0^-}} + \underbrace{C_i^0 - C_i^t}_{\substack{\text{Période création d'émission} \\ C_i^0 \rightarrow 0^+}}$$

$$C = (E^f - E^c)(X^f - X^c) \text{ Avec } C_i^{t+1} < 0 \text{ et } C_i^t > 0$$

$$\text{Sachant que } (E_i^f - E_i^c) < 0 \text{ alors } \begin{cases} (X_i^f - X_i^c)^t < 0 \\ (X_i^f - X_i^c)^{t+1} > 0 \end{cases}$$

Soit pour la période C_i^0 à C_i^{t+1} :

$$\begin{aligned} \lim_{C_i^0 \rightarrow 0^-} C_i^{t+1} - C_i^0 &= \lim_{C_i^0 \rightarrow 0^+} -(-C_i^{t+1} - C_i^0) \\ \lim_{C_i^0 \rightarrow 0^+} -(-C_i^{t+1} - C_i^0) &= \lim_{C_i^0 \rightarrow 0^+} \left[\frac{(-C_i^{t+1}) - C_i^0}{\ln(-C_i^{t+1}) - \ln(C_i^0)} \ln\left(\frac{-C_i^{t+1}}{C_i^0}\right) \right] \\ \lim_{C_i^0 \rightarrow 0^+} -C_i^{t+1} - C_i^0 &= - \lim_{C_i^0 \rightarrow 0^+} \left[\frac{(-C_i^{t+1}) - C_i^0}{\ln(-C_i^{t+1}) - \ln(C_i^0)} \ln\left(\frac{-\{(X_i^f - X_i^c)(E_i^f - E_i^c)\}^{t+1}}{\sqrt{C_i^0}^2}\right) \right] \\ \lim_{C_i^0 \rightarrow 0^+} -C_i^{t+1} - C_i^0 &= - \lim_{C_i^0 \rightarrow 0^+} \left[\frac{(-C_i^{t+1}) - C_i^0}{\ln(-C_i^{t+1}) - \ln(C_i^0)} \ln\left(\frac{-(X_i^f - X_i^c)^{t+1}}{-\sqrt{C_i^0}}\right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{(-C_i^{t+1}) - C_i^0}{\ln(-C_i^{t+1}) - \ln(C_i^0)} \ln\left(\frac{(E_i^f - E_i^c)^{t+1}}{-\sqrt{C_i^0}}\right) \right] \end{aligned}$$

Soit pour la période C_i^t à C_i^0

$$\begin{aligned} \lim_{C_i^0 \rightarrow 0^+} C_i^0 - C_i^t &= \lim_{C_i^0 \rightarrow 0^+} \left[\frac{C_i^0 - C_i^t}{\ln(C_i^0) - \ln(C_i^t)} \ln\left(\frac{C_i^0}{C_i^t}\right) \right] \\ \lim_{C_i^0 \rightarrow 0^+} C_i^0 - C_i^t &= \lim_{C_i^0 \rightarrow 0^+} \left[\frac{C_i^0 - C_i^t}{\ln(C_i^0) - \ln(C_i^t)} \ln\left(\frac{\sqrt{C_i^0}^2}{\{(X_i^f - X_i^c)(E_i^f - E_i^c)\}^t}\right) \right] \\ \lim_{C_i^0 \rightarrow 0^+} C_i^0 - C_i^t &= \lim_{C_i^0 \rightarrow 0^+} \left[\frac{C_i^0 - C_i^t}{\ln(C_i^0) - \ln(C_i^t)} \ln\left(\frac{-\sqrt{C_i^0}}{(X_i^f - X_i^c)^t}\right) + \frac{C_i^0 - C_i^t}{\ln(C_i^0) - \ln(C_i^t)} \ln\left(\frac{-\sqrt{C_i^0}}{(E_i^f - E_i^c)^t}\right) \right] \end{aligned}$$

Soit enfin :

$$\begin{aligned} \Delta(E_i^f - E_i^c) = & \lim_{c_i^0 \rightarrow 0^+} \left(\frac{C_i^0 - C_i^t}{\ln(C_i^0) - \ln(C_i^t)} \ln \left(\frac{-\sqrt{C_i^0}}{(E_i^f - E_i^c)^t} \right) \right) \\ & - \lim_{c_i^0 \rightarrow 0^+} \frac{(-C_i^{t+1}) - C_i^0}{\ln(-C_i^{t+1}) - \ln(C_i^0)} \ln \left(\frac{(E_i^f - E_i^c)^{t+1}}{-\sqrt{C_i^0}} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

Et :

$$\begin{aligned} \Delta(X_i^f - X_i^c) = & \lim_{c_i^0 \rightarrow 0^+} \frac{C_i^0 - C_i^t}{\ln(C_i^0) - \ln(C_i^t)} \ln \left(\frac{-\sqrt{C_i^0}}{(X_i^f - X_i^c)^t} \right) \\ & - \lim_{c_i^0 \rightarrow 0^+} \frac{(-C_i^{t+1}) - C_i^0}{\ln(-C_i^{t+1}) - \ln(C_i^0)} \ln \left(\frac{-(X_i^f - X_i^c)^{t+1}}{-\sqrt{C_i^0}} \right) \end{aligned} \quad (14)$$