HEC MONTRÉAL

Impact des politiques climatiques sur la relocalisation des industries manufacturières canadiennes : une estimation basée sur les différentiels de prix de l'énergie.

par

Lama Fakhoury

Sciences de la gestion
(Option économie appliquée)

Mémoire présenté en vue de l'obtention
du grade de maîtrise ès sciences en gestion
(M. Sc.)

Juin 2020

© Lama Fakhoury, 2020

Résumé

Les politiques climatiques unilatérales s'appliquent à une région ou à un pays spécifique dans le but d'y contrôler le niveau d'émissions de gaz à effet de serre. Bien que la volonté dernière de telles politiques soit bonne, l'augmentation des coûts d'exploitation relatifs qui en résulte pourrait nuire à la compétitivité des industries dans le pays régulé. L'objectif de ce mémoire est d'étudier comment une politique de prix sur le carbone impacterait la relocalisation de la production des industries manufacturières canadiennes à travers les variations dans la différence entre les prix de l'électricité au Canada et à l'étranger. Les effets de telles variations sur les importations, les exportations et la production, présentés sous forme d'élasticités, sont au cœur de cette analyse. Estimées à partir d'un modèle économétrique similaire à Fowlie, Reguant et Ryan (2016), elles permettront de calculer le transfert de production et les émissions qui y sont associées sous de telles régulations. Les résultats démontrent qu'une tarification de 50 $ par tonne de CO_2 a un impact qui varie entre -24,99 % à +9,50 % sur les importations selon l'industrie. La diminution de la production domestique et celle des exportations varient respectivement de 3,85 % à 9,79 % et entre 5,73 % à 12,48 %. Bien que l'effet moyen sur ces variables soit robuste à travers les différentes spécificités du modèle, les élasticités estimées au niveau des industries sont plus sensibles. De plus, nos résultats démontrent que le risque de relocalisation de la production est généralement plus élevé pour les industries les plus dépendantes du commerce international. L'augmentation de la production étrangère, estimée à partir des changements dans les flux commerciaux, associée à un dollar de réduction de production intérieure est en moyenne de 174 %. Un taux aussi élevé suggèrent qu'une politique de tarification sur le carbone pourrait faire augmenter le niveau d'émissions global au lieu de le faire diminuer. Nous terminons l'analyse en démontrant que le risque de fuites d'émissions pour le secteur manufacturier canadien pourrait particulièrement être élevé. Ceci résulte de la grande dépendance commerciale avec les États-Unis qui ont une intensité en émissions presque deux fois plus élevée que le Canada pour ce secteur.

Mots clés : Compétitivité, Électricité, Énergie, fuites de carbone

Table des matières

Résumé ii
Table des matières iii
Liste des figures iv
Liste des tableaux iv
Liste des abréviations v
Remerciements vi
Introduction 1
Revue de la littérature 4
Estimations par modèles économétriques 4
Estimations par modèles d'équilibre général calculable 6
Estimations des effets pour le Canada 7
Chapitre 1 : Méthodologie 10
1.1 Le modèle 10
1.2 Les prix de l'énergie 12
1.3 Les principaux défis 14
Chapitre 2 : Construction des variables et sources de données 16
2.1 Les variables et leurs sources de données 17
Chapitre 3 : Résultats d'analyses 22
3.1 Les impacts sur la production et les échanges commerciaux 22
3.2 La politique de tarification du carbone 24
3.3 Robustesse du modèle 26
Chapitre 4 : Transfert de production et fuites de carbone 29
4.1 Les taux de transfert de production 29
4.2 Intensité en énergie et intensité des échanges 31
4.3 Estimations des fuites d'émissions 34
Conclusion 36
Bibliographie 38
Annexes i

Liste des figures

Figure 1.1 — Prix de l'électricité et du gaz naturel pour le Canada et les États-Unis, secteur industriel, $ 2010, entre 2004 et 2016 13

Figure 1.2 — Prix de l'électricité et du gaz naturel pour le Canada et 4 autres partenaires commerciaux, secteur industriel, $ 2010, entre 2004 et 2016..... 13

Figure 2.1 — Intensité énergétique moyenne par industrie 19

Figure 3.1 — Élasticités-prix (%) en fonction de l'intensité énergétique moyenne par industrie..... 23

Figure 4.1 — Taux de transfert de production (%) par industrie..... 31

Figure 4.2 — Intensités en énergie et des échanges par industrie (SCIAN)..... 32

Figure 4.3 — Taux de transfert de production (%), intensité en énergie et intensité des échanges par industrie 33

Liste des tableaux

Tableau 3.1 — Coefficients de régression associés à un modèle sans intensités en énergie 22

Tableau 3.2 — Élasticités-prix moyennes par nombre d'années retardées (%) 27

Liste des abréviations

HEC École des hautes études commerciales

GTAP Global Trade Analysis Project

OCDE Organisation de coopération et de développement économiques

SCIAN Système de classification des industries de l'Amérique du Nord

SCEQE Système communautaire d'échange de quotas d'émission

Remerciements

Alors mon parcours à HEC Montréal prend fin, je voudrais d'abord remercier mon directeur de recherche, Justin Caron. Par son expertise et ses disponibilités, j'ai pu surmonter les nombreux obstacles rencontrés lors de la réalisation de ce mémoire. Merci de m'avoir proposé un sujet de recherche qui a su répondre à mes intérêts et me motiver à mener à terme ce projet.

Cette aventure m'a appris à demander de l'aide, à mieux m'organiser, mais surtout à me féliciter et être fier de mes petites tâches accomplies au quotidien. C'est toutefois le support constant de ma famille qui m'a permis de persévérer et de ne pas lâcher prise. À ma chère sœur, merci d'être constamment disponible et prête à m'aider en français depuis mon tout jeune âge. Je vous remercie de m'avoir soutenue et motivée tout au long de mon parcours académique. Siham, un grand merci pour nos longues conversations et remises en question sur nos choix de vie et d'études depuis le secondaire. Ça nous a finalement amenés à quelque chose : nous terminons un deuxième cycle !

À Mahdi, mon meilleur ami et partenaire de vie, merci pour les nombreuses soirées dans les cafés où tu prétendais travailler sur ton ordinateur portable pour m'accompagner et m'encourager durant ma rédaction. Je t'en suis tellement reconnaissante.

Introduction

Le Canada s'est engagé en lien avec l'Accord de Paris à réduire, d'ici 2030, ses émissions de gaz à effets de serre de 30 % par rapport à 2005. Pour ainsi respecter sa cible et la dépasser, le *Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques*[1] propose une série de mesures qui comprend un système de tarification de la pollution par le carbone. En effet, en vertu de la *Loi sur la tarification de la pollution causée par les gaz à effet de serre*, le *Système canadien de tarification fondé sur le rendement* (STFR) est mis en place dans toutes les provinces qui en font la demande ou dont la régulation n'est pas conforme aux exigences fédérales. De cette façon, le système permet d'assurer qu'une tarification de la pollution sur le carbone s'applique partout à l'échelle du Canada. Le STFR vise notamment les industries qui émettent 50 000 tonnes de pollution ou plus par année. Toutefois, les industries émettant 10 000 tonnes de pollution ou plus peuvent également adhérer volontairement au système[2].

Plus précisément, ce système de tarification basé sur le rendement propose une limite d'émissions de pollution établie en fonction de la production et du niveau d'émission de gaz à effet de serre pour chaque secteur. Ce principe incite les industries à forte intensité en émissions et les plus exposées au commerce international à réduire leur niveau de pollution tout en restant compétitives et en atténuant le risque des fuites d'émissions. En effet, plus la production d'un secteur est élevée, plus la limite d'émission permise sera élevée. C'est ainsi que la politique permet de réduire le risque de relocalisation de la production et des émissions associées vers des régions moindrement régulées. Les industries qui dépassent le niveau de pollution établi doivent s'acquitter de leur obligation de conformité en payant une taxe ou en achetant des crédits compensatoires.

En théorie, plusieurs études suggèrent un réel risque de relocalisation et de perte en compétitivité lorsque les politiques climatiques ne sont pas appliquées partout et de la

---

[1] Canada, Environnement et changement climatique Canada (2016). « *Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques : Plan canadien de lutte contre les changements climatiques.* »

[2] Gouvernement du Canada, *La tarification du carbone : cadre de réglementation du système de tarification fondé sur le rendement*

même façon à travers les pays. En effet, la différence dans les régulations climatiques entre pays pourrait faire augmenter le coût de production relatif des industries (Dechezleprêtre et Sato, 2017). L'augmentation dans les coûts de production qui résulte de la conformité à de telles politiques pourrait faire perdre des parts de marché au profit de compétiteurs étrangers moindrement régulés. N'ayant pas d'incidence sur les niveaux d'émissions à l'extérieur du pays, ces régulations climatiques dites unilatérales incitent alors les industries à relocaliser une partie de leurs activités économiques vers des pays ou régions moindrement régulés. Cette relocalisation de production est mesurée par le l'augmentation dans la production à l'extérieur du pays ou de la région où la politique s'applique. Étant difficilement observables, ces augmentations seront estimées à partir des changements dans les flux commerciaux pour la présente étude. De plus, tout comme Fowlie, Reguant et Ryan (2016), le taux de transfert de production fera référence à l'augmentation, en pourcentage, de la production étrangère qui serait associée à un dollar de réduction dans la production domestique. Les fuites d'émissions, quant à eux, représentent l'augmentation dans le niveau d'émissions de carbone à l'extérieur du pays règlementé. Ces relocalisations et les fuites d'émissions associées remettraient alors en question l'efficacité des politiques climatiques nationales.

Ce mémoire contribue aux études existantes et peu nombreuses portant sur les politiques environnementales unilatérales et leurs conséquences potentielles sur la relocalisation et le risque de fuites de carbone des industries manufacturières au Canada. En ayant un modèle d'analyse relativement semblable, ce mémoire s'appuie sur la recherche de Fowlie, Reguant et Ryan (2016) portant sur la Californie avec des analyses complémentaires dont nous expliquerons dans le chapitre présentant la méthodologie. À partir d'un modèle économétrique à effets fixes, la présente recherche estime l'impact de telles politiques sur la production et les échanges commerciaux à travers une hausse du prix relatif de l'électricité. Ceci devient possible à partir de l'hypothèse selon laquelle la tarification du carbone aura un impact similaire sur les industries à toutes autres variations de prix de l'énergie. L'étude se concentre sur 50 industries manufacturières canadiennes à 6 chiffres classés selon le *Système de classification des industries de l'Amérique du Nord* (SCIAN).

Les résultats d'estimation suggèrent qu'une augmentation d'un pourcent du prix relatif de l'électricité a un effet moyen négatif sur la production et les exportations. De plus, l'impact moyen est positif pour les importations. Au niveau des industries, les réductions sur la production et les exportations varient respectivement entre 0,36 % à 0,90 % et entre 0,53 % à 1,15 % avec des baisses plus importantes pour les industries à forte intensité énergétique. Les élasticités-prix pour les importations varient toutefois entre -2,31 % à +0,88 % selon l'industrie. Nous prouvons que l'effet marginal moyen sur chacune de nos variables dépendantes est robuste aux différentes hypothèses du modèle. Au niveau des industries, la relation entre les différentes élasticités estimées et l'intensité en énergie est quant à elle plus sensible. À partir de ces élasticités, nous calculons les effets d'une politique prospective de prix de 50 $ par tonne de CO_2 ainsi que les taux de transfert de production. Nos résultats suggèrent que le taux de transfert moyen est de 173,80 % et varie de 0,10 % à 622,42 % selon l'industrie. Les industries les plus exposées au commerce international connaissent généralement un transfert de production plus élevé. Cela dit, des taux de transfert supérieur à 100 % suggèrent que le niveau d'émissions global pourrait augmenter sous politique climatique unilatérale au Canada.

Ce mémoire débute par une revue de littérature résumant les effets des politiques climatiques sur la compétitivité et les fuites d'émissions par méthode d'estimation. Ce chapitre traitera également des principaux résultats qui concernent le Canada. La méthodologie s'ensuit en présentant le modèle et les principaux défis associés à notre estimation. La présentation de la construction des variables fera objet du chapitre 2 et le chapitre 3 est consacré à l'analyse des résultats avec une section sur la robustesse des élasticités estimées. Les analyses des taux de transfert de production et des taux de fuites de carbone feront l'objet du dernier chapitre de ce mémoire.

Revue de la littérature

Malgré un nombre limité d'études mettant l'accent sur le contexte canadien, de nombreuses recherches estimant le risque de relocalisation et de fuites de carbone dû aux politiques climatiques unilatérales existent au niveau international. Ce chapitre est consacré à la présentation des principaux résultats de ces études par différentes méthodes d'estimation. La dernière section de ce chapitre se concentre sur les résultats d'estimations pour le Canada.

En effet, les différentes recherches soulèvent généralement deux approches à partir desquelles les impacts des politiques environnementales sur la compétitivité et les fuites d'émissions sont évalués. D'abord, permettant de comprendre l'effet sur l'économie dans son ensemble, certaines recherches font appel à des modèles d'équilibre général calculable. Les modèles d'équilibre partiels se concentrant sur les effets pour un secteur particulier sont aussi populaires dans la littérature. Ensuite, certaines recherches, incluant celle-ci, proposent plutôt un modèle économétrique utilisant l'historique de la variation des prix d'énergie passés pour illustrer l'effet d'une politique prospective de prix sur le carbone.

Estimations par modèles économétriques

Se basant sur l'historique de la relation entre les variations de prix de l'énergie et des échanges internationaux, Aldy et Pizer (2015) suggèrent qu'une politique de tarification du carbone de 15 $ par tonne de CO_2 aux États-Unis entraîne une baisse de la production pouvant atteindre 5 % pour les industries manufacturières les plus énergivores. Les effets sur la compétitivité, définis comme le changement dans les importations nettes, représentent, au plus, un sixième de cette diminution. En d'autres mots, la baisse de production n'est pas remplacée par une augmentation équivalente en importations. Cette recherche, tout comme d'autres, se base sur l'hypothèse selon laquelle les politiques climatiques augmentent le coût de production des industries dans le pays régulé, ce qui peut ainsi nuire à la compétitivité de ces dernières face aux compétiteurs étrangers.

Ayant une méthodologie similaire, l'étude de Fowlie, Reguant et Ryan (2016) rajoute la dimension de l'intensité des échanges internationaux à son analyse. En effet, de façon cohérente à ce que le *California Air Resources Board* (CARB) considère comme industries à risque, les auteures suggèrent un transfert de production plus élevé pour les industries les plus énergivores et les plus exposées au commerce. Pour l'industrie à intensité énergétique médiane de leurs données, une augmentation de 10 % du prix de l'énergie domestique engendrerait une réduction de la production de 4 à 10 %. Une augmentation dans les prix de la même ampleur ferait diminuer les exportations de 3 à 9 % et augmenter les importations de 2 à 4 %. Les auteurs mettent toutefois en lumière la sensibilité des élasticités face aux différentes spécificités du modèle. Ainsi, ils estiment l'effet d'une politique de prix sur le carbone de 10 $ par tonne de CO_2 à partir des élasticités obtenues des 192 spécifications du modèle évaluées. Dans une nouvelle version de cette étude, Fowlie et Reguant (2020) estiment un taux global de fuites qui varie entre 30 % et 50 % tout en révélant la difficulté d'estimer avec précision ces taux au niveau des industries. Cette version contient divers ajouts à leur version antérieure, dont l'estimation des intensités d'émissions étrangères à partir de la base de données internationale Exiobase.

La recherche de Casey et al. (2020) se démarque de ses prédécesseurs en analysant les effets sur la compétitivité des industries manufacturières d'une politique de prix sur le carbone au niveau des états américains. Selon les auteurs, une part importante du transfert de production, d'emplois et des profits se répand dans les états américains avoisinant plutôt que vers d'autres pays. Le niveau de fuites et la perte en compétitivité peuvent être réduits en élargissant les politiques climatiques pour y inclure d'autres États.

Se concentrant sur le contexte européen, Branger, Quirion et Chevallier (2017) et Sato et Dechezleprêtre (2015) suggèrent des impacts nettement inférieurs à ce qui est estimé par les auteurs précédents. En effet, pour cette dernière, une augmentation de 10 % du prix de l'énergie relatif entre deux pays et secteurs impacterait les importations de l'ordre de 0,2 %. Leur modèle prédit qu'un prix de 40–65 € par tonne de CO_2 sous le *Système communautaire d'échange de quotas d'émission* de l'Union européenne (SCEQE)

augmenterait les importations de moins de 0,05 % et ferait diminuer les exportations de 0,2 %.

À la suite de ces constatations, il ne serait pas faux de conclure que les politiques climatiques ont généralement un impact sur la relocalisation de la production industrielle et les fuites d'émissions. Les impacts se font surtout ressentir pour les industries à forte intensité énergétique et les plus exposées au commerce international. En effet, selon Fischer et Fox (2018), une meilleure estimation de la sensibilité aux échanges aiderait à mieux identifier les secteurs les plus exposés à un risque de fuites de carbone sous l'effet de politiques climatiques. Il importe toutefois de souligner la sensibilité des résultats en fonction du modèle choisi et de la portée géographique à l'étude.

Estimations par modèles d'équilibre général calculable

L'approche par modèles d'équilibre général est toutefois plus populaire et a longtemps été utilisée pour évaluer le niveau de fuites d'émissions et les pertes de compétitivités engendrées par les politiques climatiques (ex. : Babiker (2005) ; Rivers (2010) ; Fischer et Fox (2012)). Ces modèles, malgré la différente manière dont ils sont exécutés dans la littérature, sont utiles dans la mesure où ils permettent d'estimer les effets sur l'ensemble de l'économie face à divers changements politiques ou facteurs externes. En effet, Di Maria et Van der Werf (2007) soulignent la pertinence de l'utilisation d'un modèle d'équilibre général pour tenir compte des changements technologiques causés par une politique climatique. L'étude estime que les analyses économiques portant sur de telles politiques qui ne tiennent pas compte des effets des changements technologiques tendent à surestimer le niveau de fuites de carbone.

Babiker (2005), est parmi les importantes études estimant l'effet de politiques climatiques unilatérales sur l'économie. Les résultats suggèrent un potentiel de relocalisation des industries énergivore à l'extérieur des pays de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) élevé avec un taux de fuites d'émission pouvant atteindre 130 %. Ceci est vrai avec un modèle Heckscher–Ohlin a rendement d'échelle croissant et produits parfaitement homogènes. Toujours en se concentrant sur les pays de l'OCDE, Felder et Rutherford (1993) suggèrent plutôt que les taux de fuites devraient

atteindre 45 % en 2030-2040, mais qu'une lente diminution est prévue pour le reste du siècle.

La recherche d'Elliott et al. (2010) fait partie de ceux estimant des taux de fuites beaucoup plus modeste. L'étude, à partir d'un modèle d'équilibre général CIM-EARTH, simule l'effet sur la production et les émissions d'une taxe sur le carbone qui varie entre 15 $ à 175 $ sur les États-Unis, les pays de l'annexe B (visé par le protocole de Kyoto) et les pays hors annexe B. Les résultats démontrent que les taux de fuites d'émissions augmentent avec le montant de la taxe sur le carbone et varient de 15 % à plus de 25 %. Communément jointe à une analyse sur l'efficacité des politiques de mitigation de fuites, l'étude de Fischer et Fox (2012) analyse l'impact d'une taxe de 14 $ la tonne de CO_2 sur la compétitivité et les taux de fuites pour 7 secteurs économiques. Les résultats suggèrent des taux de fuites variant entre 2 à 58 % lorsque la politique environnementale n'est jumelée à aucune autre politique d'ajustement.

Il importe de souligner que très peu d'études estiment des effets négligeables d'une politique climatique sur la compétitivité des industries. De façon conforme aux résultats de l'étude de Sato et Dechezleprêtre (2015), Demailly et Quirion (2008) estiment que les pertes de production et de profitabilité associées au SCEQE sont relativement faibles pour les secteurs de la fabrication du fer et de l'acier à partir d'un modèle d'équilibre partiel.

Estimations des effets pour le Canada

À partir du niveau de prix sur le carbone qui reflète les objectifs de réductions pour 2020 du gouvernement fédéral, la recherche de Rivers (2010) est parmi celles focalisant sur les effets des politiques climatiques canadiennes sur la compétitivité des industries. Les résultats suggèrent, à l'aide d'un modèle d'équilibre général, un impact sur la compétitivité qui varie entre -9,1 % à 3,2 % selon le secteur. Cette étude définit la compétitivité comme le changement relatif du rapport des prix mondiaux aux prix auxquels les entreprises domestiques produisent des biens. L'étude mentionne que la compétitivité de certains secteurs augmente sous politique climatique, notamment pour le secteur des services consommant que très peu d'énergie. Ceci est dû à la baisse des salaires, d'une légère dépréciation de la valeur du dollar canadien et des variations de la

demande de produits de base sous de telles politiques. Les résultats prévoient une perte de 2,81 % du PIB pour 2020 dans un scénario où une politique de prix sur le carbone n'est jumulé à aucune autre mesure atténuant les impacts négatifs sur la compétitivité. L'étude juge que la compétitivité de plusieurs industries à forte intensité énergétique et commerciale peut être particulièrement à risque en cas d'introduction d'un prix du carbone canadien agressif.

Plusieurs recherches qui concernent le Canada cherchent à évaluer les effets économiques de la conformité du pays au protocole de Kyoto. Bien qu'ils n'évaluent pas les effets de politiques prospectives, ces études restent utiles dans la mesure où il informe quant aux réactions des industries canadiennes sous l'effet de politiques climatiques. Toujours à partir d'un modèle d'équilibre général, mais statique, Babiker et Rutherford (2005) estiment que le Canada est parmi les pays les plus touchés par la relocalisation dans le contexte de l'accord de Kyoto. Les résultats suggèrent une baisse de la production de biens à forte intensité énergétique de 11,5 % et une baisse des exportations de 13,3 % dans une situation où la politique n'est jumelée à aucune mesure d'ajustement aux frontières. D'autres études ont aussi, de proche ou de loin, analyser l'impact de la conformité du Canada au protocole de Kyoto. C'est le cas de Dissou, Mac Leod et Souissi (2002). Les auteurs expliquent qu'adopter un modèle d'équilibre général dans une structure de marché concurrentiel surestimerait les coûts de bien-être de 30 % relativement à un cadre monopolistique. Toutefois, le coût sur le produit intérieur brut est presque semblable entre ces deux approches à long terme.

Malgré la popularité de l'utilisation d'un modèle d'équilibre général pour estimer les incidences d'une politique climatique sur la compétitivité et les fuites d'émission, ce mémoire focalisera plutôt sur un modèle économétrique captant les variations historiques des prix de l'électricité relatifs. En effet, comme le suggèrent Fowlie et Reguant (2020), les modèles d'équilibre général sont limités dans la précision avec laquelle ils peuvent estimer des élasticités au niveau des industries. D'ailleurs, Caron (2012) et Fischer et Fox (2018) font partie des auteurs analysant l'incidence du niveau d'agrégation des secteurs sur l'estimation des fuites qui résultent des politiques climatiques. Fischer et Fox (2018), estiment que les élasticités des échanges commerciaux des industries à un niveau

désagrégé sont plus variables que pour les secteurs plus agrégés. Pour plusieurs industries, les estimations des fuites de carbone sont même plus élevées. Pour cela, l'étude compare les effets sur les secteurs de la base de données du *Global Trade Analysis Project* (GTAP) à ceux des secteurs désagrégés à 6 chiffres du *Système de classification des industries de l'Amérique du Nord* (SCIAN). En augmentant le niveau de détails sectoriels dans un modèle d'équilibre général, Caron (2012) estime que l'augmentation des importations industrielles et le niveau CO_2 contenu dans ces importations sont plus faibles dans les modèles agrégés sous politique de tarification du carbone. Il argumente toutefois que le niveau d'agrégation industriel ne semple pas affecter le niveau global de fuites. Pour ainsi tenter d'estimer des effets précis à un niveau très désagrégé d'industrie (SCIAN à 6 chiffres), la présente étude basera son estimation sur un modèle économétrique à effets fixes semblable à Fowlie, Reguant et Ryan (2016).

Chapitre 1 :
Méthodologie

Ce chapitre présentera le modèle d'estimation, quelques précisions en lien avec la variable de prix relatif, ainsi que les principaux défis reliés à notre analyse. Il importe de rappeler pour cette section que la présente recherche se base sur l'hypothèse selon laquelle une politique climatique unilatérale fait augmenter le coût de production relatif des industries polluantes. Cette méthodologie suppose évidemment que la réaction des industries face à une taxe sur le carbone soit semblable à celle qui serait observée pour une hausse dans les prix de l'énergie. Comme expliqué par Fowlie et Reguant (2018), l'augmentation dans les coûts de production des industries pourrait amener à une relocalisation de la production vers des lieux où les régulations sont moindrement sévères. La hausse de la production dans les pays étrangers, si supérieure à la baisse de la production dans le pays régulé, pourrait alors augmenter le niveau d'émission de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale. Pour cette étude, les changements dans les flux commerciaux servent d'indicateur indirect (*proxy*) des variations dans la production étrangère. La variation historique des prix relatifs entre le Canada et le reste du monde permettront d'estimer les impacts d'une politique prospective de prix sur le carbone au Canada.

1.1 Le modèle

Les effets sur la production, les importations et les exportations d'une hausse de 1 % du prix de l'électricité relatif nous permettront de calculer l'effet d'une politique prospective de prix sur les déplacements de production industrielle. Ces effets, exprimés sous forme d'élasticités, sont estimés à partir du modèle économétrique à effets fixes suivant :

$$ln(y_{it}) = B_0 + B_1.ln\left(\frac{p_t^d}{P_{it}^f}\right) + B_2.IE_{it} + B_3.ln\left(\frac{p_t^d}{P_{it}^f}\right).IE_{it} + +B_4.ln(w_{it}) + \emptyset_i + \mu_{st} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

Où i correspond à l'industrie à 6 chiffres classée selon le SCIAN et t représente l'année.

Ce modèle de régression multiple met en relation les variables dépendantes (y; production, importations et exportations) avec les variables du prix intérieur (p^d) et étranger (p^f) de l'électricité. L'interaction avec l'intensité en énergie (*IE*) permet ainsi d'obtenir des élasticités-prix par industrie, étant une étape indispensable à notre analyse. Ayant une incidence sur les décisions relatives à la production et les échanges commerciaux, le salaire annuel moyen par employé (*w)* entre dans le modèle. La production, les importations, les exportations et le prix relatif sont exprimés en logarithme naturel.

Le modèle inclut inévitablement des effets fixes pour minimiser les potentiels biais associés aux variables omises. En effet, plusieurs autres facteurs peuvent expliquer les variations sur nos variables dépendantes. Les effets fixes par industrie ($\emptyset_i$) permettent de contrôler pour des caractéristiques inobservées, constantes dans le temps et spécifiques à chaque industrie. L'étude de Fowlie, Reguant et Ryan (2016) donne l'exemple des différences dans les coûts de production étrangers et intérieurs qui persistent et qui diffèrent d'une industrie à l'autre. Conformément à Aldy et Pizer (2015) et Fowlie, Reguant et Ryan (2016), nous incluons aussi des effets fixes par année-secteur à 2 chiffres (SCIAN) (η_{st}). Ceci devrait permettre de tenir compte des tendances spécifiques à chaque secteur qui varient dans le temps.

Il importe de souligner que, pour l'équation (1), les observations sont pondérées par la valeur moyenne de la variable dépendante correspondante par industrie entre 2004 et 2016. Cette façon de faire est cohérente avec Fowlie, Reguant et Ryan (2016) et Aldy et Pizer (2015). Elle vient corriger le problème selon lequel les industries dont les valeurs de production, d'importations ou d'exportations sont très faibles peuvent avoir des effets très élevés sur nos estimations.

Les élasticités-prix estimées à partir de ce modèle permettront ensuite de calculer les impacts d'une politique climatique prospective de prix de 50 $ par tonne de CO_2 sur la production et les échanges commerciaux. Cette tarification du carbone reflète les objectifs prévus dans le *Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques* pour 2022. Ces élasticités permettront aussi de mesurer le potentiel de

relocalisation de production industrielle des industries sous politique climatique unilatérale à partir de la formule du taux de transfert de production. Ce taux, qui sera présenté au dernier chapitre, permet de mesurer l'augmentation de la production étrangère associée à une réduction en dollars de la production domestique à travers les changements dans les flux commerciaux. Le taux de transfert de production, lorsque multiplié par le ratio des intensités en émission étrangère et domestique permettra aussi d'obtenir le taux de fuites de carbone.

L'étude aura un modèle d'analyse essentiellement similaire à celui de Fowlie, Reguant et Ryan (2016), pour le Canada, avec quelques variantes. Tout d'abord, l'indice de prix étranger inclut les prix et les données sur les importations et exportations des différents états américains. Cette façon de faire permettra d'obtenir un indice de prix étranger plus précis et rajoutera un potentiel source de variabilité dans nos données. De plus, nous explorerons la relation des taux transfert de production avec l'intensité énergétique et celle des échanges commerciaux pour mieux comprendre le contexte dans lequel des fuites de carbone peuvent avoir lieu. Nous rentrerons plus en détail sur ces corrélations dans le chapitre 4.

1.2 Les prix de l'énergie

Il est nécessaire d'insister sur le fait que la présente étude se concentre uniquement sur les variations du prix relatif de l'électricité. En effet, estimer les élasticités-prix à partir d'un modèle avec indice de prix domestique qui inclut le prix de l'électricité et du gaz naturel donnent de résultats contre-intuitifs. Les élasticités-prix d'importations obtenues à partir de ce modèle d'estimation sont positives pour la totalité des industries étudiées et varient entre 0,32 % à 1,15 %. Ces résultats nous ont donc permis de porter une attention particulière sur la corrélation dans les prix du gaz naturel entre le Canada et les États-Unis.

Comme démontré à la figure 1.1, à partir de 2009, le prix du gaz naturel connaît une importante baisse due à l'effet du boom du gaz de schiste aux États-Unis. La diminution entre 2008 et 2012 est de 64,8 %. L'effet s'est également fait ressentir au Canada avec une baisse du prix du gaz naturel de 65,5 % durant cette même période. Cette corrélation

est en grande partie attribuée à l'envergure continentale du marché de cette source d'énergie. À titre comparatif, la figure 1.2 illustre la différence dans les variations du prix du gaz naturel et de l'électricité entre le Canada et d'autres partenaires commerciaux.

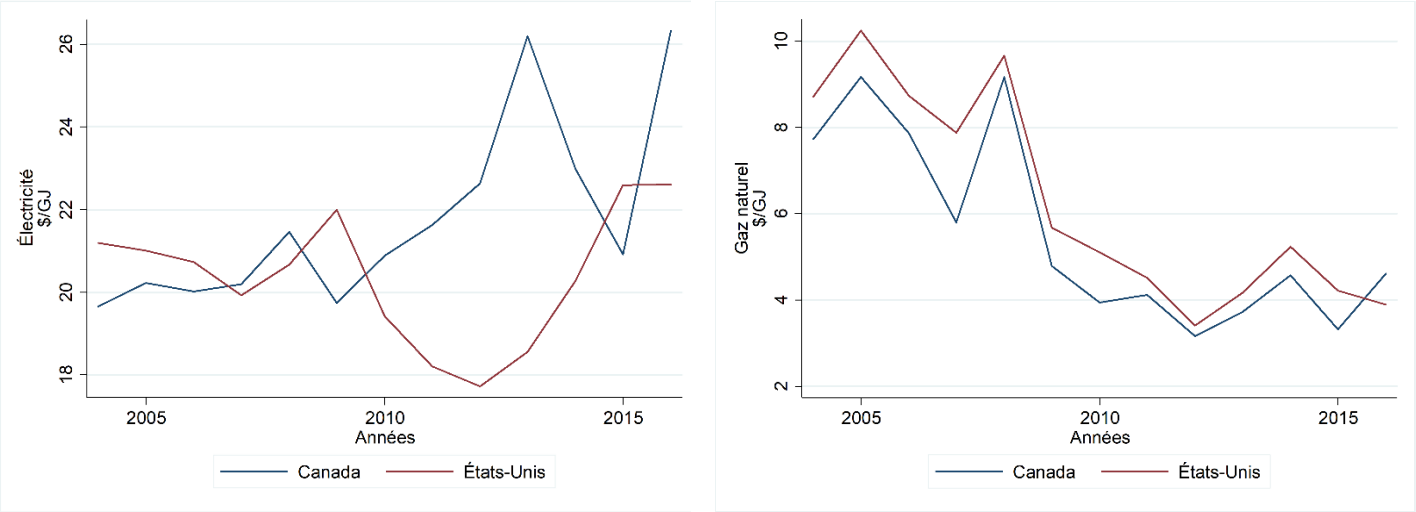

Figure 1.1 — Prix de l'électricité et du gaz naturel pour le Canada et les États-Unis, secteur industriel, $ 2010, entre 2004 et 2016

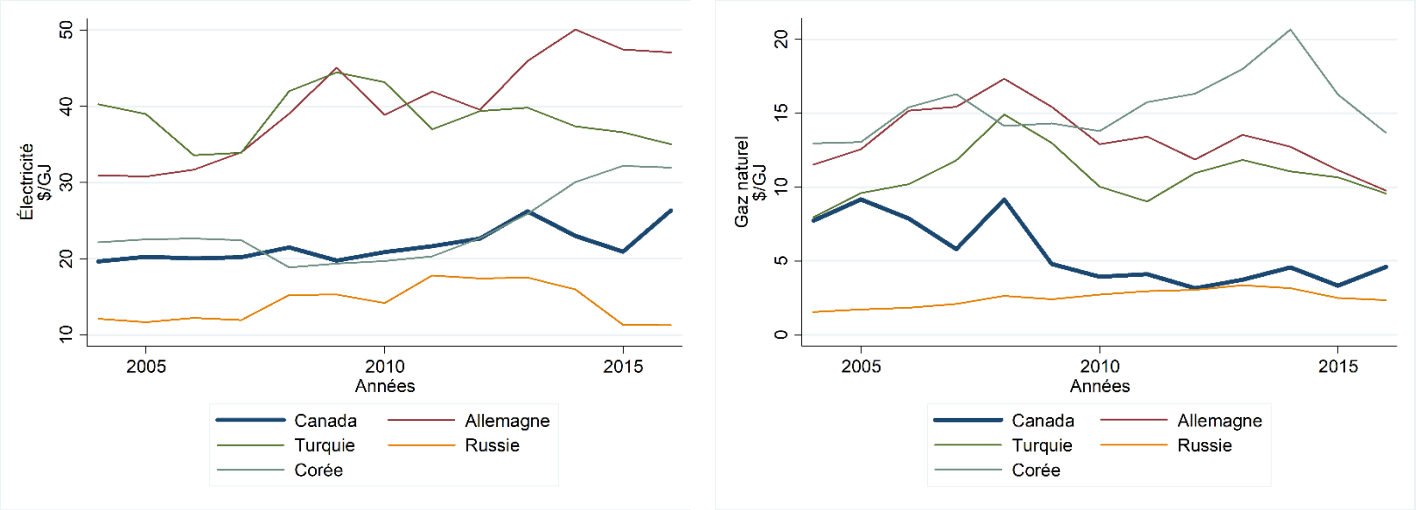

Figure 1.2 — Prix de l'électricité et du gaz naturel pour le Canada et 4 autres partenaires commerciaux, secteur industriel, $ 2010, entre 2004 et 2016

Les partenaires commerciaux présentés dans les graphiques de la figure ci-haut sont la Turquie, l'Allemagne, la Russie et la Corée du Sud.

En focalisant sur le prix de l'électricité, on observe toutefois des fluctuations différentes entre le Canada et les États-Unis. Comme l'illustre le graphique gauche de la figure 1.1, le Canada connaît une hausse du prix de l'électricité de 32,6 % entre 2009 et 2013. Une baisse du prix de 15,6 % est toutefois observée pour les États-Unis durant cette même période. Les prix de l'électricité varient selon la province ou la région, principalement en fonction du mode de production électrique et de la structure du marché (réglementation) en cours.

Étant donné que les États-Unis sont les principaux partenaires commerciaux du Canada, la corrélation dans les prix du gaz naturel amènerait des complications à notre estimation comme précédemment expliquées. En effet, une variabilité entre les prix nationaux et les prix étrangers est nécessaire pour pouvoir étudier les comportements historiques des industries lors d'un changement dans le prix d'énergie relatif. Pour cette raison, ainsi que pour le manque de données sur les autres sources d'énergie, la présente recherche mettra uniquement l'accent sur les variations du prix relatif de l'électricité.

1.3 Les principaux défis

L'étude de Fowlie, Reguant et Ryan (2016) présente une série de défis en lien avec leur modèle d'estimation. Nous reprenons essentiellement les mêmes défis qui concernent notre étude et expliquons la façon dont on y fait face.

Un des principaux défis mentionnés est que la théorie ne précise pas la forme fonctionnelle que devrait prendre la relation entre nos différentes variables dépendantes et les prix de l'énergie. Différentes spécificités du modèle, dont sans pondération et sans effets fixes par secteur ont été considérés. Ces différentes spécificités permettent de tester la robustesse des élasticités-prix estimées, ce qui limite les biais associés à notre approche de modélisation.

Évidemment, plusieurs facteurs influencent les échanges commerciaux et la production autre que le changement dans les prix de l'électricité. Pour cela, le modèle inclut un ensemble d'effets fixes, tel que présenté précédemment. Ceux-ci permettront d'éliminer

les potentiels problèmes liés aux variables omises qui pourraient expliquer à la fois les prix et les variables dépendantes.

Ensuite, comme expliqués par Fowlie, Reguant et Ryan (2016), les effets d'une augmentation des coûts de production sur les industries peuvent prendre du temps à se faire ressentir. Analyser la réponse des industries à court terme peut ne capturer qu'une fraction de la réponse aux changements des coûts d'exploitation. Un horizon temporel plus long engendre un risque que les changements dans le temps soient entraînés par d'autres facteurs. L'étude de Aldy et Pizer (2015) souligne également les difficultés liées à l'utilisation des variations de prix d'énergie relatifs passés pour comprendre les effets d'une politique de prix futur. Les auteurs font remarquer que le passé n'est pas toujours un bon indicateur du futur et qu'il convient de bien préciser l'horizon temporel pour lequel les résultats sont interprétés. Dans la section testant la robustesse des résultats du modèle, nous analysons comment varient les élasticités-prix estimées lorsque les variables de prix relatif, d'intensité en énergie et les salaires sont retardées d'une à quatre années.

Chapitre 2 :
Construction des variables et sources de données

Ce chapitre est consacré à la présentation des différentes variables du modèle ainsi qu'à leurs sources de données respectives. Il est important de souligner que la construction des variables est principalement tirée de Fowlie, Reguant et Ryan (2016). Les données sur les échanges commerciaux, la production, les salaires et les indices de prix canadien et étranger sont exprimées en dollars canadiens de 2010 pour éliminer toute variation dans les prix dus à l'inflation.

Étant un sous ensemble du secteur le plus énergivore et parmi le plus exposé au commerce international[3], cette étude se concentre sur les industries du secteur manufacturier à 6 chiffres classé selon le *Système de classification des industries de l'Amérique du Nord* (SCIAN) entre 2004 et 2016. Ce système permet de classer les différentes données économiques selon l'industrie pour le Canada, les États-Unis et le Mexique. Les bases de données récupérées de Statistique Canada se base sur la version de 2012 du SCIAN à l'exception des données sur l'*Enquête annuelle sur les industries manufacturières et de l'exploitation forestière* pour les années de 2004 à 2012. La version 2007 du SCIAN est utilisée pour cette base de données, mais nous l'avons adaptée à celle de 2012 en changeant les noms et les codes des industries pour lesquelles il y a eu des changements.

La fusion de l'ensemble des bases de données nous limite à un total de 50 industries manufacturières canadiennes. Ensemble, ces industries consomment près de 82 % de la consommation d'énergie totale du secteur de la fabrication en 2018[4]. Une part importante des industries à l'étude appartient au secteur de la fabrication de matériel de transport (366), suivi du secteur de la fabrication de produits chimiques (325). La liste complète des 50 industries manufacturières à 6 chiffres se retrouve au tableau 3 en annexe.

[3] Selon la base de données complète sur la consommation d'énergie de Ressources naturelles Canada qui repose sur des données de Statistique Canada.
[4] Pourcentage obtenu à partir des données de la base de données de l'*Enquête annuelle sur la consommation industrielle d'énergie* de Statistique Canada.

2.1 Les variables et leurs sources de données

Commerce international

Les données sur le commerce englobent 30 pays faisant partie de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), 10 pays hors OCDE ainsi que 50 états américains. Les pays ont été choisis en fonction de la disponibilité des données pour les prix de l'électricité. Les données concernant les importations et les exportations en dollars canadiens pour les 50 industries, entre 2004 et 2016, proviennent de la base de données du Gouvernement du Canada. Cette banque fournit les données sur le commerce par année et par industrie SCIAN. Comme il a été précédemment mentionné, les données pour les États-Unis sont réparties par états américains pour une plus grande précision lors de nos estimations.

Les prix de l'énergie canadiens et étrangers

Les données sur les prix de l'électricité pour le Canada proviennent de la base de données du *Energy Prices and Taxes Statistics* tirée l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA). Cette même banque de données fournit les prix de l'énergie pour les pays de l'OCDE et hors OCDE. La banque de données *OCDE iLibrary* fournit par l'École des hautes études commerciales de Montréal (HEC Montréal) ainsi qu'un abonnement au IEA nous ont permis d'avoir accès à ces données. Quant aux prix de l'électricité des différents états américains, ils proviennent du *Energy Information administration* (EIA). Tous ses prix concernent le secteur industriel et ont été convertis en dollars canadiens par les taux de change annuels moyens de l'OCDE. De plus, les prix en dollars par mégawattheure ont été convertis en dollars par gigajoule pour concorder avec l'unité de mesure des données sur la consommation d'énergie de l'*Enquête annuelle sur la consommation industrielle d'énergie* de Statistique Canada.

Afin de créer les indices de prix de l'électricité étrangers par industrie, les prix de l'électricité sont pondérés par l'importance de chaque pays en termes d'importations et d'exportations pour chaque année. On obtient alors 2 indices de prix étrangers par industrie, soit le prix de l'électricité pour les importations et le prix de l'électricité pour

les exportations. Par exemple, l'équation permettant de générer les indices de prix étrangers pour les importations est la suivante :

$$P_{it}^{f_M} = \sum_c P_{ct}^{elec} \cdot \gamma_{cit}^{I} \tag{2}$$

Où $\gamma_{cit}^{I} = \frac{I_{cit}}{\sum_c I_{cit}}$ correspond à la part des importations ou des exportations du pays c par industrie i et année t par rapport à l'ensemble des pays dans la base de données. L'indice de prix de l'électricité relatif est le ratio du prix de l'électricité au Canada sur l'indice du prix étranger. L'indice de prix relatif varie à travers les industries à partir de l'indice de prix étranger de l'électricité.

L'intensité énergétique

L'intensité en énergie d'une industrie correspond à la part de ses dépenses en énergie sur le coût de production total. L*'Enquête annuelle sur les industries manufacturières et de l'exploitation forestière* de Statistique Canada fournit les données sur le coût combiné de l'énergie et de l'approvisionnement en eau. Selon les données de l*'Enquête sur l'eau dans les industries* de Statistique Canada, le coût total de l'eau dans les industries de la fabrication représente 10,7 % des dépenses totales en énergie et en approvisionnement en eau en 2015. Étant la donnée la plus récente de cette enquête, nous posons comme hypothèse que le coût de l'énergie total par industrie représente alors 89 % du coût de l'énergie et d'approvisionnement en eau. La variable est construite comme suit :

$$IE_{it} = \frac{Coût\ de\ l'énergie_{it}}{Coût\ de\ production_{it}} \tag{3}$$

Les données sur le coût de production total par industrie proviennent aussi de l*'Enquête annuelle sur les industries manufacturières et de l'exploitation forestière*. Ce dernier équivaut à la somme du salaire des employés de production, du coût de l'énergie et d'eau ainsi que celui des matériels et fournitures. Selon l'industrie, l'intensité en énergie varie entre 0,41 % à 43,95 % avec une moyenne globale de l'ordre de 8,19 %.

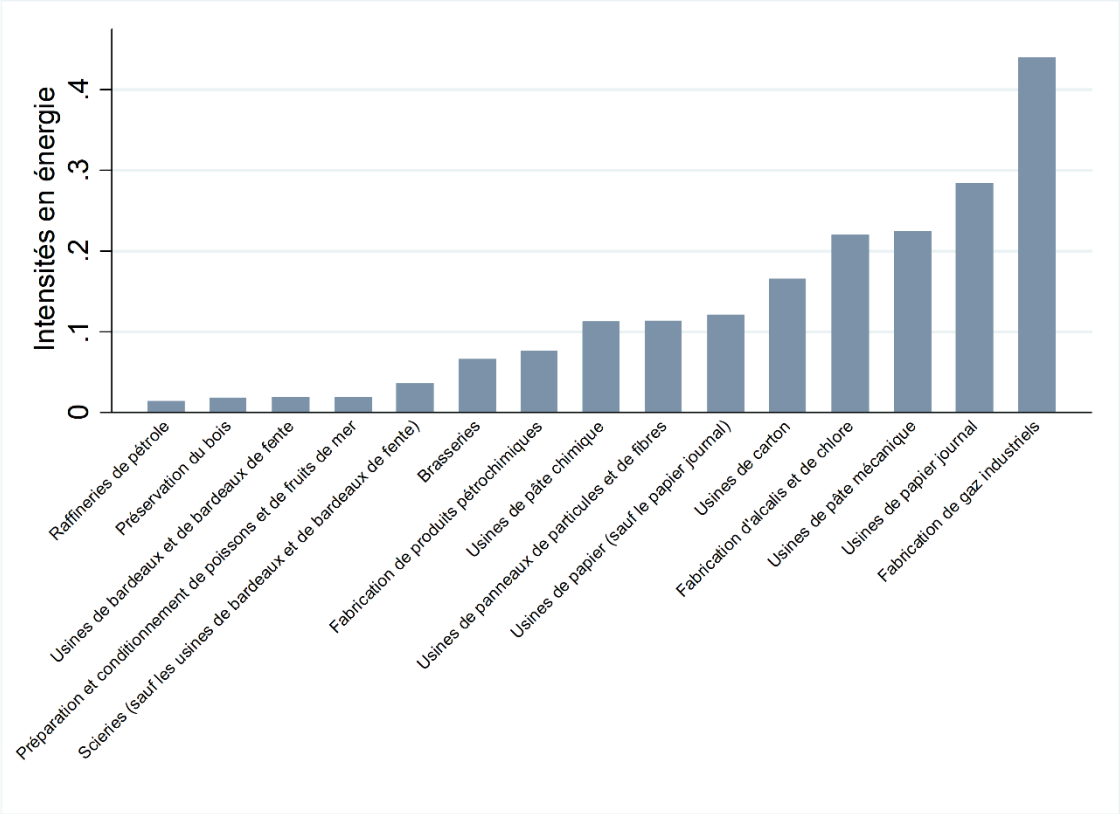

Figure 2.1 — Intensité énergétique moyenne par industrie

La figure ci-haut présente les intensités en énergie pour à travers 15 industries choisies aléatoirement.

Les dépenses en énergie auraient aussi pu être calculées à partir du prix et de la consommation totale d'électricité par industrie. L'inconvénient avec cette approche est que le coût des autres combustibles n'est pas inclus dans cette somme. Les intensités énergétiques qui résultent de cette façon de faire sont peu réalistes puisqu'elles pourraient sous-estimer le coût total de l'énergie des industries utilisant d'autres combustibles.

Intensité en émissions de CO_2

Les données sur l'intensité en émissions pour l'électricité, mesurée en tonnes de CO_2 par gigajoule (GJ), proviennent de la *Base de données complète sur la consommation d'énergie* de Ressources Naturelles Canada. Elles sont obtenues en divisant les émissions totales (mégatonnes de CO_2) par la consommation totale d'électricité (PJ) pour le secteur industriel. Ces intensités sont ensuite converties en tonnes de CO_2 par gigajoule pour concorder avec l'unité de mesure des prix. Les données concernant les émissions de

CO2 n'étaient pas disponibles pour la totalité des industries à l'étude. C'est pour cette raison que nous avons ainsi une mesure qui ne varie pas entre industries.

Une autre façon de mesurer l'intensité moyenne en émissions qui tient compte de la taille économique de chaque industrie consiste à diviser le niveau d'émission total entre 2004 et 2016 par la production domestique totale, mesurée en dollars, pour ces années. Cette intensité sera utilisée pour le calcul du taux de fuites d'émissions. Le niveau d'émission total est mesuré à partir du produit de la consommation totale d'électricité q_{jt}^{elec} avec le niveau moyen d'émission de CO_2 par gigajoule de consommation de cette source d'énergie e_t^{elec}.

$$Intensité\ en\ émissions_j = \frac{\sum_t (q_{jt}^{elec} e_t^{elec})}{\sum_t (q_{jt}^{d})} \tag{4}$$

Salaire par employé direct

Le salaire par employé de production (w_{it}) est une variable pertinente à notre analyse en raison de l'impact qu'elle a sur la production et les échanges commerciaux. En effet, les salaires représentent une part importante des coûts d'exploitation d'une industrie. Les données sur les salaires proviennent de l'*Enquête annuelle sur les industries manufacturières et de l'exploitation forestière* de Statistique Canada. La variable correspond au ratio du revenu total annuel direct des employés sur le nombre total de travailleurs direct par année et industrie.

$$w_{it} = \frac{Revenu\ total_{it}}{nbr\ d'employés_{it}} \tag{5}$$

Pour conclure cette section, il importe de préciser que les données sur l'intensité énergétique et les prix de l'électricité étrangers n'étaient pas disponibles pour certaines années entre 2004 et 2016. L'interpolation linéaire a été utilisée pour combler ces valeurs manquantes. Pour avoir des données les plus réalistes possible, les observations pour lesquelles les données comblées sont négatives ont été remplacées par les données positives qui les précèdent ou qui les suivent. Cette approche est également utilisée par l'étude d'Aldy et Pizer (2015) et les résultats sont qualitativement similaires à si les données

étaient restées manquantes. Il importe aussi de rappeler que les données sur le commerce international sont exprimées en dollars canadiens et ceux concernant les prix de l'électricité ont été convertis du dollar américain au dollar canadien à partir des taux de change annuels moyens de l'OCDE. Nous n'avons donc pas eu besoin de convertir les prix de l'électricité étrangers en dollars canadiens à partir du taux de change respectif à chaque pays.

Chapitre 3 :
Résultats d'analyses

Rappelons que l'analyse se fait en plusieurs étapes. Cette section débute avec la présentation des impacts estimés sur la production et les flux commerciaux. Par la suite, à l'aide de ces estimations, nous déterminons les impacts sur la production et les échanges commerciaux d'une prospective politique de prix sur le carbone. L'analyse de la robustesse des résultats fera l'objet de la dernière section de ce chapitre.

3.1 Les impacts sur la production et les échanges commerciaux

Avant d'estimer les impacts au niveau des industries, il serait d'abord intéressant d'estimer les impacts moyens sur la production, les importations et les exportations à partir de modèles sans intensités en énergie et donc, sans interactions. Ces effets sont présentés sous forme d'élasticités. Ils mesurent les changements sur nos variables dépendantes qui seraient associés à une augmentation d'un pourcent du prix de l'électricité relatif. Les résultats obtenus suggèrent des effets intuitifs sur la production, les importations et les exportations comme le démontre le tableau 3.1. Plus précisément, une hausse du prix de l'électricité relatif de 1 % fait augmenter les importations de 0,57 %, toutes choses égales par ailleurs. L'élasticité pour la production est de -0,45 % et de -0,55 % pour les exportations. Toutes les élasticités sont significativement différentes de 0 à un niveau de confiance de 95 % et de 99 %.

Tableau 3.1 — Coefficients de régression associés à un modèle sans intensités en énergie

	Importations	Exportations	Production
Prix relatif$_t$	0,570***	-0,553**	-0,451***
	(0,140)	(0,181)	(0,128)
Salaire moyen$_{it}$	0,180*	0,917***	0,664***
	(0,089)	(0,111)	(0,118)

Les écarts types sont entre parenthèses. Les variables de prix, importations, exportations et production sont exprimées en logarithme naturel. Les coefficients associés aux effets fixes ne figurent pas dans le tableau ci-haut afin d'y faciliter la lecture. * p<0,05, ** p<0,01, *** p<0,001

À partir de l'intensité énergétique moyenne respective à chaque industrie et son interaction avec la variable de prix relatif, il devient possible de regarder comment varient les résultats à travers les différentes industries manufacturières à l'étude. En effet, la figure 3.1 présente les élasticités pour chaque industrie selon son intensité énergétique moyenne avec l'intervalle de confiance de 95 % associé.

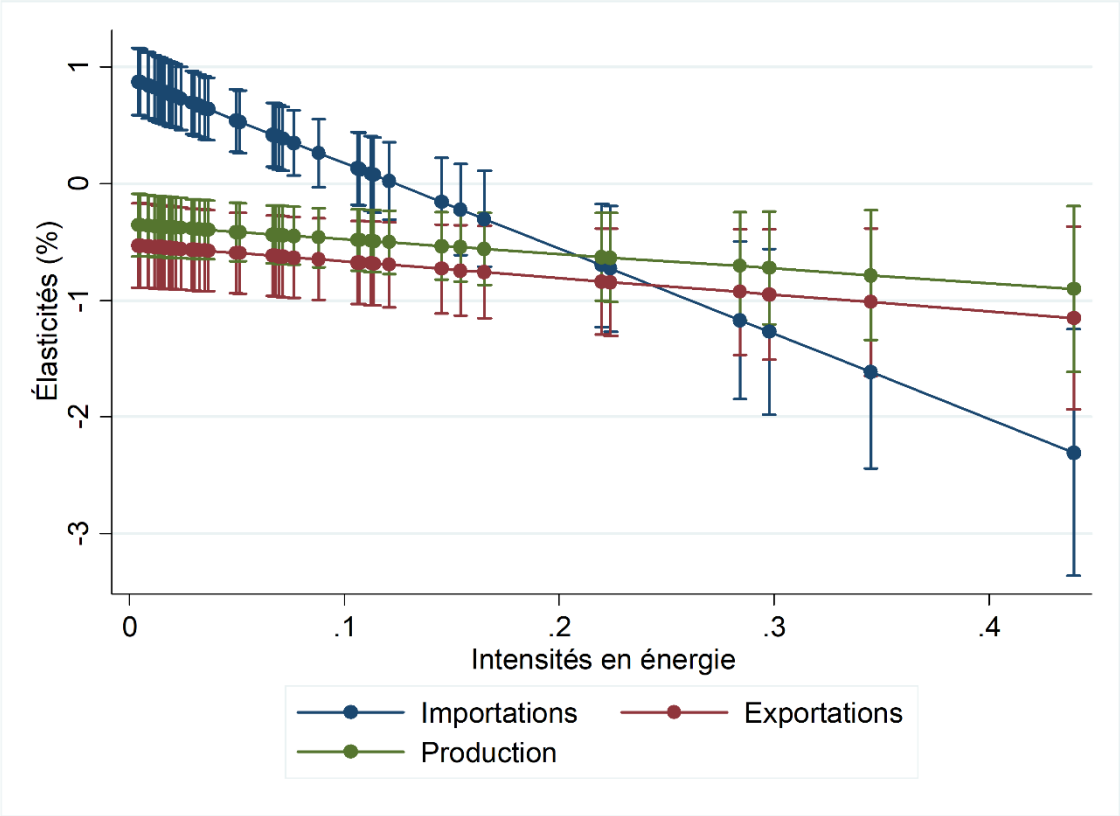

Figure 3.1 — Élasticités-prix (%) en fonction de l'intensité énergétique moyenne par industrie.

Plus précisément, pour ainsi avoir des élasticités par industrie, les effets marginaux sont calculés pour le niveau d'intensité en énergie moyen spécifique à chaque industrie. Tel qu'illustré à la figure ci-haut, une hausse du prix de l'électricité relatif de 1 % fait diminuer la production domestique d'en moyenne 0,36 % à 0,90 % selon l'industrie, en gardant les autres variables du modèle constantes. Les industries à forte intensité énergétique connaissent les baisses de production les plus élevées. Les effets sur la

production sont estimés à partir de l'indice de prix relatif qui tient compte de l'indice de prix étranger pour les importations et le seront aussi pour le reste de l'analyse. En effet, l'importation peut être considérée comme substitut à la production domestique. De plus, l'effet sur la production est plus élevé avec cette approche qu'avec l'indice de prix étranger d'exportations. Ensuite, une hausse du prix relatif de la même ampleur est associée à un impact sur les importations de -2,31 % à +0,88 % selon l'industrie, en contrôlant pour les autres variables. Bien que l'effet moyen sur les importations soit positif, les industries les plus énergivores connaissent contre-intuitivement une diminution de leurs importations. Les exportations, quant à elles, diminuent en moyenne de 0,53 % à 1,15 % avec un plus grand impact pour les industries les plus énergivores. Les effets par industrie sur la production et les exportations sont significativement différents de 0 à un intervalle de confiance de 95 %. Les élasticités-prix pour les importations ne sont toutefois pas toutes significatives à travers les industries.

À titre d'exemple, ayant une intensité énergétique moyenne de 11,24 %, l'industrie de la fabrication de produits en gypse (327420) connaît un impact négatif moyen de 0,49 % sur la production. Les importations augmentent d'en moyenne 0,09 % et les exportations baissent de 0,68 % à la suite d'une augmentation du prix de l'électricité relatif de 1 %, toutes choses étant égales par ailleurs. Le tableau 4 en annexe présente les différents coefficients associés au modèle de régression. Le tableau 5 illustre les différentes élasticités selon l'intensité énergétique moyenne des industries.

3.2 La politique de tarification du carbone

Conformément aux objectifs prévus selon le *Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques*, les prix sur la tonne de CO_2 pour les grandes industries polluantes devraient annuellement augmenter de 10 $ pour ainsi atteindre 50 $ en 2022. Cette tarification du carbone, en n'étant pas jumelée avec une autre politique, pourrait entraîner des pertes de compétitivité importantes notamment pour les industries les plus polluantes. Dans cette section, nous présentons les impacts calculés en tenant compte du taux d'émissions de CO_2 par GJ de consommation d'électricité. À titre indicatif et de façon cohérente à la norme canadienne, une politique climatique imposant un prix de 50 $ par tonne de CO_2 sera considérée. Cette analyse repose sur deux hypothèses : la politique

est la seule en cours et le coût du carbone est appliqué à chaque tonne d'émission émise. Les impacts d'une politique de prix sur la production et les échanges commerciaux ont été déterminés en multipliant l'augmentation du prix de l'énergie dû à la politique choisie par les élasticités-prix estimées. De façon générale, l'équation est traduite comme suit :

$$Impact_i = \frac{50\$ * \bar{e}}{\bar{P}} * \eta_i^y \tag{6}$$

Où $\bar{e}$ est l'intensité en émissions moyenne de l'électricité (t CO_2/GJ) entre 2004 et 2016 et $\bar{P}$ représente le prix de l'électricité moyen au Canada pour le secteur industriel. η_i^y correspond aux différentes élasticités-prix estimées pour chacune des variables dépendantes (y : production, importations et exportations).

Prenons comme exemple l'industrie de la fabrication de la chaux (327410), étant une des industries les plus énergivores de nos données, pour mieux illustrer les impacts de cette politique. D'abord, pour le secteur industriel, un gigajoule de consommation d'électricité génère en moyenne 0,047 tonne de CO_2 annuellement et la moyenne du prix de l'électricité au Canada se situe à 21,76 $ par gigajoule. Un prix de 50 $ par tonne de CO_2 ferait alors augmenter le prix de l'électricité de 10,80 %. Cette variation est considérée en échantillon (*in-sample*) étant donné que l'augmentation du prix de l'électricité qui résulte d'un prix sur le carbone de 50 $ fait partie des variations dans les prix de l'énergie relatifs observés entre 2004 et 2016. Ceci est vrai pour toutes les industries à l'étude. Sachant qu'une augmentation de 1 % du prix de l'énergie relatif ferait diminuer les importations pour l'industrie de la chaux de 1,62 % en moyenne, les importations diminueraient de 17,51 % à la suite de cette politique. De la même manière, cette politique ferait diminuer la production et les exportations d'en moyenne 8,50 % et de 11,02 % respectivement.

De façon générale, les effets sur les importations varient entre -24,99 % à +9,50 % sous cette politique. Quant à la production et les exportations, les impacts sont négatifs pour l'ensemble des industries et ils varient respectivement entre 3,85 % à 9,79 % et entre 5,73 % à 12,48 %. Les plus grandes diminutions concernent les industries à forte intensité en énergie.

3.3 Robustesse du modèle

Dans cette section, nous apportons des modifications au modèle initial afin de tester la robustesse des élasticités-prix obtenues. Nous estimons les différents impacts à partir de modèle sans effets fixes par secteur à 2 chiffres (SCIAN) et sans des pondérations. Nous comparons également les résultats obtenus lorsque l'on retarde certaines variables pour ainsi tenir compte du temps requis entre une hausse dans le prix de l'électricité relatif et la réaction des industries. Le dernier test consiste à comparer nos résultats initiaux à ceux obtenus à lorsque les données sur les prix, les importations et les exportations des différents États américains sont remplacées par ceux pour les États-Unis (dans son entier).

D'abord, sans pondérations, les effets moyens sur la production et les exportations sont de -0,36 % et de -1,66 % respectivement. De façon cohérente, la baisse de production est plus élevée pour les industries à forte intensité énergétique. Ce ne sont toutefois pas les industries à forte intensité en énergie qui connaissent de plus grandes baisses des exportations. L'effet moyen sur les importations est positif (+0,17 %), non significatif, mais plus fort pour les industries les plus énergivores. Ceci démontre que même si le signe des effets moyens semble robuste, la corrélation entre les élasticités-prix et l'intensité en énergie des industries peut être plus sensible aux différentes spécificités du modèle.

Lorsque l'on ignore les effets fixes par secteur (2 chiffres SCIAN) du modèle en gardant des effets fixes de temps et par industrie, on observe qualitativement les mêmes résultats qu'avec le modèle principal. En effet, l'élasticité moyenne pour les importations est positive (+0,92) ainsi que négative pour la production (-0,31 %) et pour les exportations (-0,76 %). Tous ces effets sont significatifs à un niveau de confiance de 95 %. Plus précisément, les effets sur les importations varient entre -1,52 % à +1,07 %. De façon non intuitive, mais conforme à nos résultats initiaux, les industries les plus énergivores connaissent des réductions de leurs importations. Les élasticités-prix pour la production et les exportations sont négatives pour toutes les industries, avec des réductions plus élevées pour celles à forte intensité en énergie.

Pour ainsi tenir compte du temps requis entre un changement dans les prix relatifs de l'électricité et la réponse des industries manufacturières, les prix, les intensités en énergie

et les salaires ont été retardés d'une à quatre périodes. Le tableau 3.2 illustre les différentes élasticités-prix par nombre d'années retardées.

Tableau 3.2 — Élasticités-prix moyennes par nombre d'années retardées (%)

	Importations	Exportations	Production
Prix relatif$_{t-1}$	0,533***	-0,861***	-0,559***
	(0,131)	(0,182)	(0,133)
Prix relatif$_{t-2}$	0,448***	-0,800***	-0,611***
	(0,127)	(0,187)	(0,135)
Prix relatif$_{t-3}$	0,587***	-0,882***	-0,686***
	(0,122)	(0,191)	(0,137)
Prix relatif$_{t-4}$	0,630***	-0,648**	-0,635***
	(0,127)	(0,202)	(0,149)

Les écarts types sont entre parenthèses. Les variables de prix, importations, exportations et production sont exprimées en logarithme naturel. * p<0,05, ** p<0,01, *** p<0,001

Les résultats suggèrent des effets moyens pour la production, les importations et les exportations qui sont intuitifs et conformes aux effets obtenus avec notre modèle principal, peu importe le nombre d'années que les variables sont retardées. Par exemple, lorsque les variables sont retardées de deux périodes, l'effet moyen sur les importations, les exportations et la production sont de +0,45 %, de -0,80 % et de -0,61 % respectivement. De plus, la relation entre les élasticités au niveau des industries et l'intensité énergétique est aussi qualitativement similaire à notre modèle initial à l'exception des effets sur la production. En effet, les élasticités-prix de la production sont contre-intuitivement plus faibles pour les industries à forte intensité énergétique lorsque les variables sont retardées de 2 à 4 périodes. Toutes les élasticités moyennes sont aussi significatives à un niveau de confiance de 95 % ainsi que de 99 %.

De plus, les résultats obtenus à partir de notre modèle principal restent relativement semblables à ceux obtenus lorsque les données sur les prix et les échanges commerciaux sur les états américains sont remplacées par ceux pour les États-Unis (en un seul pays).

En effet, les élasticités d'importations varient entre +0,82 % à -2,02 % selon l'industrie, toutes choses étant égales par ailleurs, comparativement à +0,88 % à -2,31 % avec le modèle initial. La production et les exportations, quant à elles, connaissent des réductions de 0,53 % à 1,41 % et de 0,82 % à 1,73 % respectivement, en gardant les autres variables constantes. Les industries les plus énergivores connaissent de plus grandes réductions. Ces élasticités varient entre 0,36 % à 0,90 % et entre 0,53 % à 1,15 % respectivement avec le modèle principal. De plus, la corrélation entre ces élasticités et l'intensité en énergie a aussi le même signe.

À partir de ces constatations, on peut conclure que le signe de l'effet moyen sur la production domestique, sur les importations et sur les exportations est robuste aux différentes variations du modèle. Toutefois, les élasticités par industrie sont beaucoup plus sensibles, comme que démontré par la variabilité de la corrélation entre ces dernières et l'intensité en énergie. Par exemple, ce ne sont pas toujours les industries à forte intensité en énergie qui connaissent les baisses les plus élevées de leur production et de leurs exportations. Cette constatation est cohérente avec les résultats de Fowlie, Reguant et Ryan (2016) qui soulignent la difficulté de bien estimer les effets spécifiques à chaque industrie sous une politique climatique unilatérale.

Chapitre 4 :
Transfert de production et fuites de carbone

La dernière étape de notre analyse consiste à calculer le taux de transfert de production spécifique à chaque industrie à partir des élasticités estimées. Nous explorerons ensuite la corrélation entre ce taux et les différentes intensités : énergétique et commercial. La dernière section de ce chapitre étudiera les taux de fuites d'émissions.

4.1 Les taux de transfert de production

De façon conforme à Fowlie, Reguant et Ryan (2016), un élément essentiel pour estimer les fuites d'émissions consiste à d'abord calculer le transfert de production qui résulte d'une hausse dans le prix de l'énergie relatif. Cet indice mesure, en dollars, l'augmentation des importations additionnée à la réduction des exportations qui serait associée à une réduction d'un dollar de production domestique. En effet, on considère que l'augmentation des importations et la réduction d'exportations domestique font augmenter le niveau de production à l'étranger, d'où les valeurs absolues dans l'équation 7. Les taux de transfert sont alors calculés pour les industries où, à la fois, les élasticités d'importations sont positives et ceux d'exportations et de production sont négatifs. Cette façon de faire nous restreint à un total de 41 industries sur 50 étant donné les élasticités-prix d'importations positives pour 9 industries. La formule pour calculer les taux de transfert de production est la suivante :

$$TR_i = \frac{|\eta|_i^m . \overline{M_i} + |\eta|_i^X \overline{E_i}}{|\eta|_i^p . \bar{P}_i} \tag{7}$$

$|\eta|_i^m$, $|\eta|_i^X$ et $|\eta|_i^p$ sont les élasticités-prix d'importations, d'exportations et de la production par industrie, respectivement, en valeur absolue. $\overline{M}_i$, $\bar{E}_i$ et $\bar{P}_i$ sont les moyennes d'importations, d'exportations et de la production par industrie calculées à partir des valeurs respectives entre 2004 et 2016. Le taux de transfert moyen correspond alors au ratio de la somme des changements dans les flux commerciaux des industries sur la somme de la baisse de production de ces dernières.

Les taux de transfert varient entre 0,10 % à 622,42 % selon l'industrie avec une moyenne de 173,80 %. Les taux supérieurs à 100 % peuvent être expliqués par les moyennes d'importations et/ou d'exportations plus élevées que ceux de la production. Aussi, la somme de l'augmentation des importations avec la diminution des exportations est plus élevée que la baisse de production domestique pour la majorité des industries. Par exemple, les importations et les exportations moyennes représentent 485 millions de dollars et 60,8 millions de dollars respectivement pour l'industrie de la fabrication d'engrais mixtes (325314). Quant à la production, elle se résume à 352 millions de dollars. Étant donné que l'élasticité d'importations et celle d'exportations sont plus élevées en valeur absolue que l'effet sur de la production, le taux de transfert de production pour cette industrie est plus élevé que 100 % et atteint 268,51 %. Bien que des taux supérieurs à 100 % semblent surprenants, ils ne sont toutefois pas impossibles. En effet, il importe de rappeler que Babiker (2005) suggère des taux de fuites de 130 % dans des secteurs avec biens homogènes et rendements d'échelles croissants. La liste des taux de transfert pour l'ensemble des industries se retrouve dans le tableau 6 en annexe.

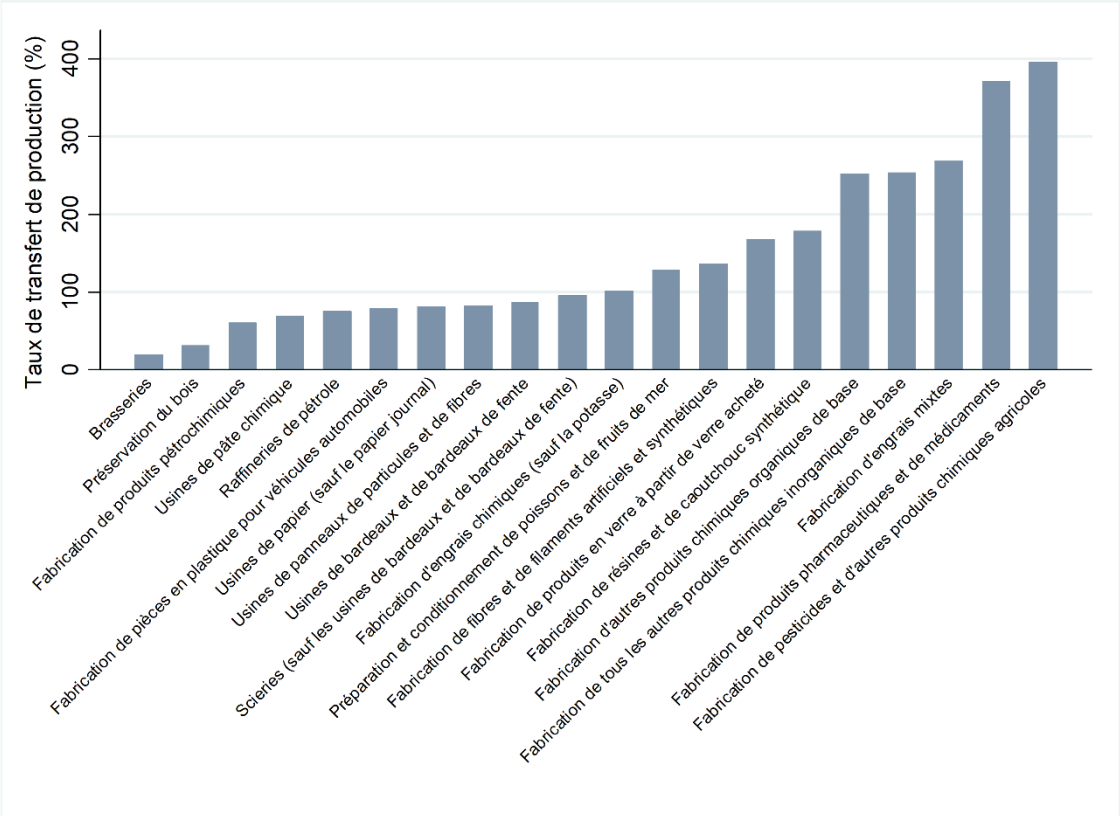

Figure 4.1 — Taux de transfert de production (%) par industrie

Le graphique 4.2 présente les taux de transfert de production, en pourcentage, pour 20 industries choisies aléatoirement.

4.2 Intensité en énergie et intensité des échanges

Le système fédéral de la tarification de la pollution par le carbone s'appuie sur divers principes pour réduire le plus possible les répercussions sur la compétitivité et les fuites d'émissions de gaz à effet de serre. Les secteurs plus particulièrement touchés sont d'importants émetteurs de pollution et dépendants du commerce international. En fait, l'intensité énergétique et l'intensité des échanges commerciaux sont souvent les deux indicateurs utilisés pour déterminer quelles industries seraient les plus exposées à des fuites de carbone à travers la littérature (ex. Fischer et Fox (2018) et Fowlie, Reguant et Ryan (2016)). Telle que précédemment définie, l'intensité en énergie correspond à la part des coûts de l'énergie sur les dépenses totales de production d'une industrie. L'intensité des échanges (*trade intensity*) correspond à la somme des importations et des exportations

sur la somme de la production et des importations. En d'autres termes, cette intensité mesure le degré d'exposition au commerce international d'une industrie. En moyenne, cette intensité est de 64,5 % pour les industries manufacturières canadiennes à l'étude. Les fonderies de fer et d'acier ainsi que les industries de fabrication du ciment et des pâtes et papiers font généralement partie des industries considérées les plus à risque. La figure 4.2 montre la combinaison de la moyenne de ces deux intensités pour les 50 industries manufacturières à l'étude. La moyenne par industrie est calculée à partir des intensités respectives entre 2004 et 2016.

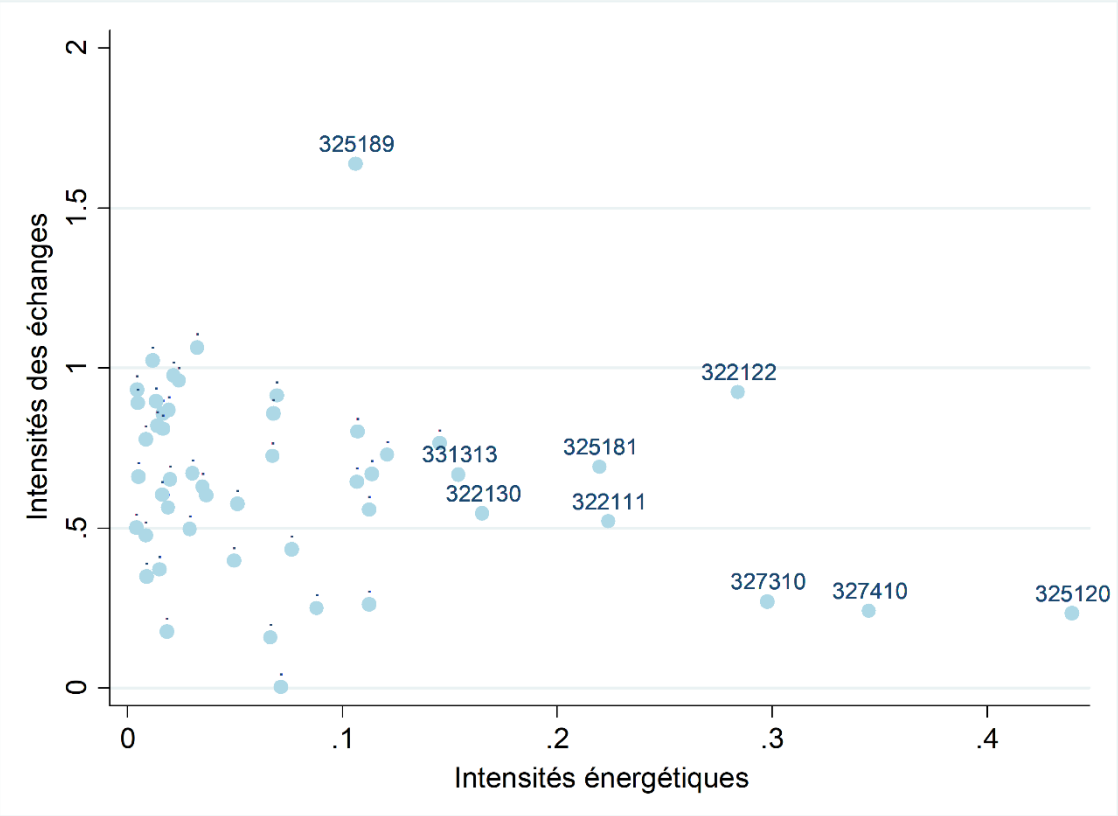

Figure 4.2 — Intensités en énergie et des échanges par industrie (SCIAN)

Les industries qui figurent dans le graphique ci-haut sont : l'industrie de la production primaire d'alumine et d'aluminium (331313), les usines de carton (322130), la fabrication d'alcalis et de chlore (325181), les usines de pâte mécanique (322111), les usines de papier journal (322122), la fabrication de ciment (327310), la fabrication de chaux (327410) ainsi que l'industrie de la fabrication de gaz industriels (325120).

Pour comprendre quelles industries seraient les plus à risque, il convient d'explorer le degré de corrélation entre les taux de transfert de production et ces deux indicateurs. En effet, la figure 4.3 met en lumière la forte corrélation positive entre le taux de transfert de production et l'intensité des échanges (+0,69). Ceci n'est pas surprenant étant donné que l'intensité des échanges est par construction liée à ce taux de relocalisation. Toutefois, la corrélation est négative (-0,50) entre le taux de transfert de production et l'intensité en énergie. Cela dit, ce ne sont pas les industries les plus énergivores qui connaissent les taux de transfert les plus élevés. Ce résultat peut être expliqué par les corrélations négatives entre l'intensité en énergie et les élasticités-prix de production, d'importations et d'exportations estimées à partir de notre modèle d'estimation principal.

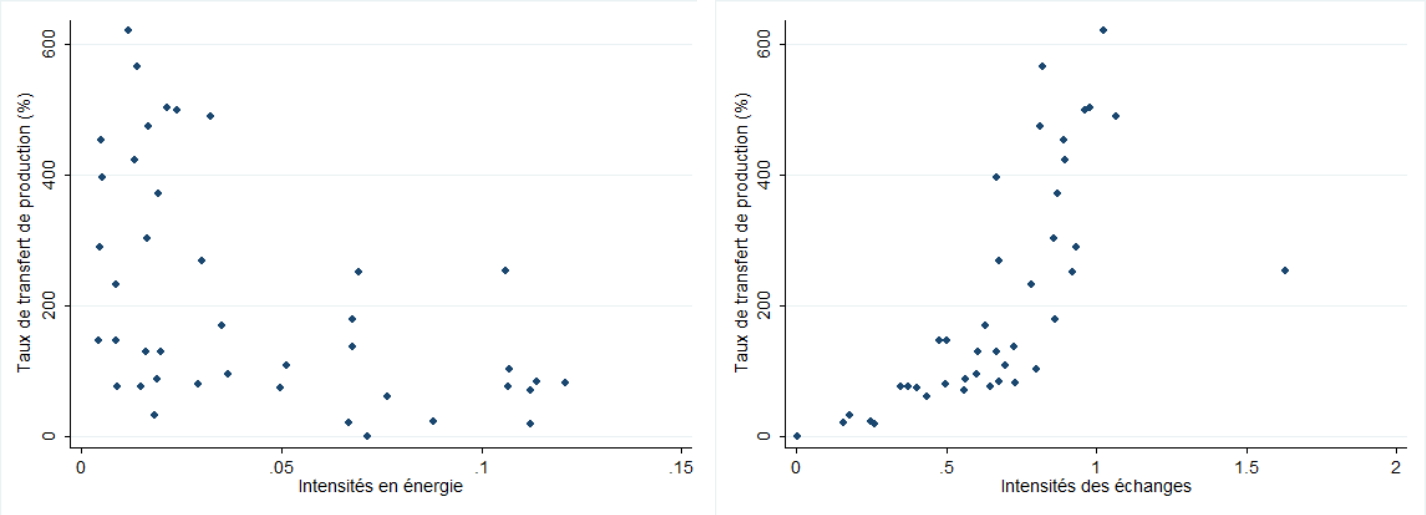

Figure 4.3 — Taux de transfert de production (%), intensité en énergie et intensité des échanges par industrie

En effet, on peut reformuler l'équation pour le taux de transfert afin de comprendre l'importance de la corrélation entre les élasticités et les intensités des changes dans le calcul des taux de transfert de production. De plus, cette formule soulève également la nécessité quant à avoir les élasticités par industrie dans l'estimation des fuites d'émissions totales. Des covariances nulles impliqueraient qu'il est possible d'estimer le taux de transfert sans biais uniquement en fonction de la moyenne de la production domestique,

des importations et des exportations. À partir de la définition même de la covariance et en réarrangeant, la somme des taux de transfert de production peut être estimée comme suit :

$$\sum_i TR_i = N * (COV(\frac{|\eta|_i^m}{|\eta|_i^p}; MI_i) + \frac{|\bar{\eta}|^m}{|\bar{\eta}|^p}.(\overline{MI}) + COV(\frac{|\eta|_i^X}{|\eta|_i^p}; XI_i) + \frac{|\bar{\eta}|^X}{|\bar{\eta}|^p}.(\overline{XI})) \quad (8)$$

MI_i et XI_i sont les intensités d'importations et d'exportations, respectivement. Ces intensités représentent respectivement la part des importations et des exportations sur la production totale par industrie.

À partir de ces constatations, on estime qu'en général, le risque de relocalisation est donc plus élevé pour les industries les plus exposées au commerce. Étant donné que la corrélation entre les élasticités-prix et l'intensité en énergie varie en fonction du modèle présenté (comme démontré à la section 3.3), on ne peut déterminer avec certitude le sens de la corrélation entre les taux de transfert et cette intensité. En d'autres termes, ces taux de transfert dépendent des différentes élasticités-prix obtenues et donc, du modèle spécifique choisi.

4.3 Estimations des fuites d'émissions

Pour mesurer le taux de fuites de carbone, le taux de transfert de production devrait être multiplié par le ratio des intensités en émissions étrangères et domestiques $\frac{e_f}{e_d}$. Ceci permettrait de calculer la hausse des émissions étrangères associée à la réduction d'une tonne de CO_2 sous politique climatique au Canada. En considérant des intensités semblables, le taux de transfert de production pourrait alors estimer le taux de fuites d'émissions. Malheureusement, il est difficile d'avoir accès aux données sur le niveau d'émissions de CO_2 pour tous les pays pour un secteur donné. Cela étant dit, nous nous concentrerons uniquement sur le ratio de ces intensités entre le Canada et les États-Unis pour le secteur manufacturier dans son ensemble (31-33) pour 2014.[5] Le calcul des

[5] Les données sur la consommation d'énergie et la livraison totale pour le secteur manufacturier aux États-Unis proviennent du *Manufacturing energy consumption survey* (MECS) et du *Annual Survey of Manufactures* (ASM) respectivement. Les données sur les émissions de CO_2 et de consommation énergétique pour le secteur industriel proviennent du *Energy Information Administration*. L'année 2014 est l'année la plus récente du MECS qui concorde avec les années étudiées dans ce mémoire.

intensités en émissions consiste à diviser les émissions totales de CO_2 associées à la consommation d'électricité par la production totale mesurée en dollars. L'intensité par 1 000 $ de production est de 0,046 tonne de CO_2 pour le Canada et de 0,075 tonne pour les États-Unis. Les émissions par 1000 $ de production sont donc plus de 1,6 fois plus élevées aux États-Unis qu'au Canada pour le secteur manufacturier. Cela dit, pour un taux transfert donné, le taux de fuites serait presque 2 fois plus élevé. De plus, étant donnée la grande dépendance commerciale entre le Canada et les États-Unis, il ne serait pas faux de croire que le taux de transfert de production vers les États-Unis serait alors très élevé entre ces deux pays.

Malheureusement, les taux de transfert n'ont toutefois pas pu être calculés à partir d'un scénario où le Canada échange uniquement avec les États-Unis en raison des élasticités-prix positives obtenues pour la production. Calculer le taux de transfert à partir d'élasticités-prix positives sur la production viendrait complètement changer l'interprétation de ce dernier. De plus, cet exercice n'a pas pu être fait pour la totalité des industries à l'étude en raison du manque de donnée sur la consommation d'énergie pour certaines industries SCIAN à 6 chiffres pour les États-Unis.

Conclusion

La présente étude s'inspire des différences entre les régulations climatiques à travers les pays ainsi que sur la relocalisation de la production et de fuites d'émission qui en résulte. Plus précisément, l'objectif de ce mémoire est d'expliquer comment la production et les échanges commerciaux des industries manufacturières canadiennes seraient impactés sous une politique unilatérale de tarification du carbone. Les estimations sont basées sur les différences des prix de l'électricité entre le Canada et l'étranger à partir d'un modèle économétrique semblable à Fowlie, Reguant et Ryan (2016). Ces effets, exprimés sous élasticités, nous ont permis de calculer l'impact d'une politique climatique de 50 $ par tonne de CO_2 et le taux de transfert de production respectif à chaque industrie.

D'abord, nous avons déterminé que les effets moyens sur la production, les importations et les exportations sont intuitifs. En se concentrant sur les effets au niveau des industries, les résultats du modèle suggèrent une baisse de la production de 0,36 % à 0,90 % à la suite d'une hausse du prix de l'électricité relatif de 1 %. L'effet sur les importations est plutôt hétérogène à travers les industries et varie entre +0,88 % à -2,31 %, en gardant les autres variables constantes. Les exportations, quant à elles, diminuent d'en moyenne 0,53 % à 1,15 % avec un plus grand impact pour les industries les plus énergivores. Les effets moyens sur la production, les importations et les exportations sont robustes aux différentes variantes du modèle. Nous avons toutefois déterminé que les corrélations entre les différentes élasticités-prix estimées au niveau des industries et l'intensité en énergie sont plus sensibles. Ce ne sont donc pas toujours les industries énergivores qui connaissent les plus grandes baisses de leur production et de leurs exportations. De la même façon, l'effet sur les importations par industrie n'est pas constant à travers les différentes variantes du modèle. À partir de ces estimations, nous avons ensuite calculé l'effet d'un prix de 50 $ par tonne de CO_2 sur nos différentes variables dépendantes. L'impact sur les importations atteint +9,50 % pour l'industrie à plus faible intensité en énergie. Les diminutions de production et des exportations atteignent 9,79 % et 12,48 % respectivement, pour l'industrie avec la plus forte intensité en énergie.

Ensuite, toujours à partir des élasticités-prix estimées, nous avons calculé les taux de transfert de production, étant essentiels au calcul du taux de fuites d'émissions. Ces taux varient entre 0,10 % à 622,42 % selon l'industrie avec une moyenne nationale de 173,80 %. Ce taux implique que la baisse d'un dollar de production domestique sous politique climatique unilatérale ferait augmenter de presque deux dollars le niveau de la production étrangère. Tel que le suggère Babiker (2005), des taux de fuites supérieurs à 100 % sous politique climatique unilatérale feraient augmenter le niveau d'émissions mondial au lieu de le réduire. De plus, nos résultats suggèrent que les industries à forte intensité des échanges seraient généralement les plus à risque face à des politiques climatiques unilatérales.

Par sa méthodologie et les défis encourus, ce mémoire contribue aux recherches peu nombreuses sur les politiques climatiques et leurs conséquences potentielles sur la relocalisation des industries manufacturières au Canada. La forte corrélation des prix du gaz naturel entre le Canada et les États-Unis limite notre analyse à ne tenir compte que de la variation du prix de l'électricité relatif pour estimer l'incidence d'une taxe sur le carbone sur les entreprises manufacturières canadiennes. Le manque de donnée disponible sur l'ensemble des autres sources d'énergie par industrie restreint aussi le degré de précision avec lequel les résultats sont estimés. Toutefois, la différence entre l'intensité des émissions pour le secteur manufacturier entre les États-Unis et le Canada reflète l'ampleur que peuvent prendre les fuites d'émissions entre ces deux pays. En effet, le Canada dépend beaucoup des États-Unis du point de vue économique, ce qui rend les échanges de biens énergivores plus faciles qu'avec n'importe quel autre pays dans le monde. Bien comprendre le contexte dans lequel les fuites de carbone ont lieu permettrait d'ensuite mettre en place des politiques de mitigation plus efficace.

Bibliographie

Aldy, Joseph E et William A Pizer (2015). « The competitiveness impacts of climate change mitigation policies », *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, vol. 2, no 4, p. 565-595.

Babiker, Mustafa H. (2005). « Climate change policy, market structure, and carbon leakage », *Journal of International Economics*, vol. 65, no 2, p. 421-445.

Babiker, Mustafa H. et Thomas F. Rutherford (2005). « The economic effects of border measures in subglobal climate agreements », *The Energy Journal*, vol. 26, no 4, p. 99-125.

Branger, Frédéric, Philippe Quirion et Julien Chevallier (2017). « Carbon leakage and competitiveness of cement and steel industries under the eu ets: Much ado about nothing », *The Energy Journal*, vol. 37, no 3.

Canada, Environnement et changement climatique Canada (2016). « Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques : Plan canadien de lutte contre les changements climatiques. ».

Caron, Justin (2012). « Estimating carbon leakage and the efficiency of border adjustments in general equilibrium — does sectoral aggregation matter? », *Energy Economics*, vol. 34, p. S111-S126.

Casey, Brendan J., Wayne B. Gray, Joshua Linn et Richard Morgenstern (2020). « How does state-level carbon pricing in the united states affect industrial competitiveness? », *National Bureau of Economic Research Working Paper Series*, vol. No. 26629.

Dechezleprêtre, Antoine et Misato Sato (2017). « The impacts of environmental regulations on competitiveness », *Review of Environmental Economics and Policy*, vol. 11, no 2, p. 183-206.

Demailly, Damien et Philippe Quirion (2008). « European emission trading scheme and competitiveness: A case study on the iron and steel industry », *Energy Economics*, vol. 30, no 4, p. 2009-2027.

Di Maria, Corrado et Edwin Van der Werf (2007). « Carbon leakage revisited: Unilateral climate policy with directed technical change », *Environmental and Resource Economics*, vol. 39, no 2, p. 55-74.

Dissou, Yazid, Carolyn Mac Leod et Mokhtar Souissi (2002). « Compliance costs to the kyoto protocol and market structure in canada: A dynamic general equilibrium analysis », *Journal of Policy Modeling*, vol. 24, no 7, p. 751-779.

Elliott, Joshua, Ian Foster, Samuel Kortum, Todd Munson, Fernando Perez Cervantes et David Weisbach (2010). « Trade and carbon taxes », *American Economic Review*, vol. 100, no 2, p. 465-469.

Felder, Stefan et Thomas F Rutherford (1993). « Unilateral co2 reductions and carbon leakage: The consequences of international trade in oil and basic materials », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 25, no 2, p. 162-176.

Fischer, Carolyn et Alan K. Fox (2012). « Comparing policies to combat emissions leakage: Border carbon adjustments versus rebates », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 64, no 2, p. 199-216.

Fischer, Carolyn et Alan K. Fox (2018). « How trade sensitive are energy-intensive sectors? », *AEA Papers and Proceedings*, vol. 108, p. 130-135.

Fowlie, Meredith et Mar Reguant (2018). « Challenges in the measurement of leakage risk », *AEA Papers and Proceedings*, vol. 108, p. 124-129.

Fowlie, Meredith et Mar Reguant (2020). « Mitigating emissions leakage in incomplete carbon markets ».

Fowlie, Meredith, Mar Reguant et Stephen Ryan (2016). « Measuring leakage risk », *Report for the California Air Resources Board*.

Gouvernement du Canada *La tarification du carbone : Cadre de réglementation du système de tarification fondé sur le rendement*. https://www.canada.ca/fr/services/environnement/meteo/changementsclimatiques/action-pour-climat/tarification-pollution-carbone/systeme-tarification-fonde-rendement.html

Régie de l'énergie du Canada (2011). *Canadian energy pricing trends 2000 – 2010*. https://www.cer-rec.gc.ca/nrg/ntgrtd/mrkt/archive/2011cndnnrgprcngtrndfct/cndnnrgprcngtrndfct-eng.pdf

Rivers, Nic (2010). « Impacts of climate policy on the competitiveness of canadian industry: How big and how to mitigate? », *Energy Economics*, vol. 32, no 5, p. 1092-1104.

Sato, Misato et Antoine Dechezleprêtre (2015). « Asymmetric industrial energy prices and international trade », *Energy Economics*, vol. 52, p. S130-S141.

Annexes

Tableau 1 : Sources des données et variables

Sources	Variables	Niveau	Années
Statistique Canada. Tableau 25-10-0025-01	Consommation énergétique annuelle totale, gigajoules. (Par différentes sources d'énergie)	SCIAN (3 à 6 chiffres)	1995-2018
Données sur le commerce en direct du Gouvernement du Canada	Importations et exportations en $CA.	SCIAN à 6 chiffres	1992-2020
Statistique Canada. Tableau 16-10-0117-01	Statistiques principales pour les industries manufacturières	SCIAN (jusqu'à 5 chiffres)	2012-2018
Statistique Canada. Tableau 16-10-0038-01	Statistiques principales pour les industries manufacturières	SCIAN (jusqu'à 6 chiffres)	2004-2012
Energy information Administration (EIA)	Prix du gaz naturel par états américains. (Dollars par mille pieds cubes)	-	1997-2019
Energy information Administration (EIA)	Prix moyen de l'électricité pour le secteur industriel. (Cents/kwh)	-	2001-2018
Ressources naturelles Canada	Émissions (Mt) et consommation d'énergie (PJ) par source d'énergie pour le secteur industriel.	-	1990-2017
OCDE Données	Taux de change annuel moyen (US/CAD)	-	1997-2017
Energy Prices and Taxes Statistics (IEA)	Prix de l'électricité et du gaz naturel étranger (Dollars par Mwh)	-	2000-2017

Tableau 2 : La liste des pays et États américains

Liste des pays et États américains
40 pays : Algérie, Allemagne, Arménie, Autriche, Belgique, Bosnie-Herzégovine, Brésil, Bulgarie, Chili, Corée du Sud, Croatie, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Italie, Israël, Japon, Luxembourg, Mexique, Norvège, Nouvelle-Zélande, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République tchèque, Royaume-Uni, Roumanie, Russie, Serbie, Slovaquie, Slovénie, Suède, Suisse, Taïwan, Turquie.
50 états américains : Alabama, Alaska, Arizona, Arkansas, Californie, Colorado, Connecticut, Delaware, Floride, Géorgie, Hawaï, Idaho, Illinois, Indiana, Iowa, Kansas, Kentucky, Louisiane, Maine, Maryland, Massachusetts, Michigan, Minnesota, Mississippi, Missouri, Montana, Nebraska, Nevada, New Hampshire, New Jersey, Nouveau-Mexique, New York, Caroline du Nord, Dakota du Nord, Ohio, Oklahoma, Oregon, Pennsylvanie, Rhode Island, Caroline du Sud, Dakota du Sud, Tennessee, Texas, Utah, Vermont, Virginie, Washington, Virginie-Occidentale, Wisconsin, Wyoming.

Tableau 3 : Liste des 50 industries manufacturières canadiennes à l'étude par code SCIAN

311710	Préparation et conditionnement de poissons et de fruits de mer
312120	Brasseries
321111	Scieries (sauf les usines de bardeaux et de bardeaux de fente)
321112	Usines de bardeaux et de bardeaux de fente
321114	Préservation du bois
321216	Usines de panneaux de particules et de fibres
322111	Usines de pâte mécanique
322112	Usines de pâte chimique
322121	Usines de papier (sauf le papier journal)
322122	Usines de papier journal
322130	Usines de carton
324110	Raffineries de pétrole
325110	Fabrication de produits pétrochimiques
325120	Fabrication de gaz industriels
325181	Fabrication d'alcalis et de chlore
325189	Fabrication de tous les autres produits chimiques inorganiques de base
325190	Fabrication d'autres produits chimiques organiques de base
325210	Fabrication de résines et de caoutchouc synthétique
325220	Fabrication de fibres et de filaments artificiels et synthétiques
325313	Fabrication d'engrais chimiques (sauf la potasse)
325314	Fabrication d'engrais mixtes
325320	Fabrication de pesticides et d'autres produits chimiques agricoles
325410	Fabrication de produits pharmaceutiques et de médicaments
326193	Fabrication de pièces en plastique pour véhicules automobiles
327214	Fabrication de verre
327215	Fabrication de produits en verre à partir de verre acheté
327310	Fabrication de ciment
327410	Fabrication de chaux
327420	Fabrication de produits en gypse
331110	Sidérurgie
331313	Production primaire d'alumine et d'aluminium
331410	Fonte et affinage de métaux non ferreux (sauf l'aluminium)
331511	Fonderies de fer
331514	Fonderies d'acier
332210	Fabrication de coutellerie et d'outils à main
332510	Fabrication d'articles de quincaillerie
332810	Revêtement, gravure, traitement thermique et par le froid, et activités analogues
336110	Fabrication de voitures et de véhicules automobiles légers
336120	Fabrication de camions lourds
336310	Fabrication de moteurs et de pièces de moteurs à essence pour véhicules automobiles
336320	Fabrication de matériel électrique et électronique pour véhicules automobiles
336330	Fabrication de composants de direction et de suspension pour véhicules automobiles (sauf les ressorts)
336340	Fabrication de systèmes de freinage pour véhicules automobiles
336350	Fabrication de pièces de transmission et de groupe motopropulseur pour véhicules automobiles
336360	Fabrication de sièges et enjolivures intérieures pour véhicules automobiles
336370	Emboutissage de pièces en métal pour véhicules automobiles
336390	Fabrication d'autres pièces pour véhicules automobiles
336410	Fabrication de produits aérospatiaux et de leurs pièces
336510	Fabrication de matériel ferroviaire roulant
336990	Fabrication d'autres types de matériel de transport

Tableau 4 : Coefficients associés au modèle de régression principal

	Production	Importations	Exportations
Prix de l'électricité relatif (Importations)	-0.305*	0.907*	
	(0.137)	(0.148)	
Intensité énergétique (IE)	-1.882***	0.199	-2.985***
	(0.559)	(0.675)	(0.504)
*Prix relatif (Importations)*IE*	-1.257	-7.308***	
	(0.892)	(1.320)	
Salaire annuel moyen	0.565***	0.132	0.710***
	(0.120)	(0.088)	(0.113)
Prix de l'électricité relatif (Exportations)			-0.523**
			(0.185)
*Prix relatif (Exportations) *IE*			-1.430
			(0.943)
Constante	16.68***	19.19***	14.74***
	(1.182)	(0.890)	(1.111)
N	650	650	650

* p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001. Les écarts-types sont entre parenthèses. Les variables de production, d'importations, d'exportations et de prix relatif sont exprimées en logarithme naturel. Les coefficients associés aux effets fixes ne figurent pas dans le tableau ci-haut afin d'y faciliter la lecture.

Tableau 5: Élasticités-prix selon l'intensité énergétique moyenne des industries

Industrie Code (SCIAN)	Intensité énergétique moyenne	Élasticités		
		Production	Importations	Exportations
336990	0,41%	-0.356**	0.877***	-0.529**
		(0.136)	(0.146)	(0.184)
336110	0,45%	-0.356**	0.874***	-0.529**
		(0.136)	(0.146)	(0.184)
336120	0,47%	-0.356**	0.872***	-0.530**
		(0.136)	(0.146)	(0.184)
325320	0,52%	-0.357**	0.869***	-0.530**
		(0.136)	(0.146)	(0.183)
336510	0,84%	-0.361**	0.845***	-0.535**
		(0.135)	(0.144)	(0.183)
336410	0,85%	-0.361**	0.845***	-0.535**
		(0.135)	(0.144)	(0.183)
336360	0,89%	-0.362**	0.841***	-0.536**
		(0.134)	(0.144)	(0.183)
336340	1,16%	-0.365**	0.822***	-0.539**
		(0.134)	(0.143)	(0.182)
336310	1,34%	-0.367**	0.809***	-0.542**
		(0.133)	(0.142)	(0.181)
336320	1,39%	-0.368**	0.805***	-0.543**
		(0.133)	(0.142)	(0.181)
324110	1,47%	-0.369**	0.799***	-0.544**
		(0.133)	(0.142)	(0.181)
336370	1,61%	-0.371**	0.789***	-0.546**
		(0.132)	(0.141)	(0.181)
332510	1,64%	-0.371**	0.787***	-0.546**
		(0.132)	(0.141)	(0.181)
336390	1,65%	-0.371**	0.786***	-0.546**
		(0.132)	(0.141)	(0.181)
321114	1,83%	-0.373**	0.773***	-0.549**
		(0.132)	(0.141)	(0.180)
321112	1,89%	-0.374**	0.768***	-0.550**
		(0.132)	(0.140)	(0.180)
325410	1,93%	-0.375**	0.766***	-0.550**
		(0.132)	(0.140)	(0.180)
311710	1,98%	-0.375**	0.762***	-0.551**
		(0.131)	(0.140)	(0.180)
336330	2,14%	-0.377**	0.750***	-0.553**
		(0.131)	(0.140)	(0.180)

336350	2,39%	-0.380**	0.732***	-0.557**
		(0.131)	(0.139)	(0.179)
326193	2,90%	-0.387**	0.695***	-0.564**
		(0.129)	(0.138)	(0.178)
325314	3,01%	-0.388**	0.686***	-0.566**
		(0.129)	(0.138)	(0.178)
332210	3,24%	-0.391**	0.670***	-0.569**
		(0.129)	(0.137)	(0.178)
327215	3,51%	-0.395**	0.650***	-0.573**
		(0.128)	(0.137)	(0.178)
321111	3,65%	-0.396**	0.640***	-0.575**
		(0.128)	(0.137)	(0.177)
331514	4,96%	-0.413**	0.544***	-0.594***
		(0.127)	(0.137)	(0.176)
331410	5,13%	-0.415**	0.532***	-0.596***
		(0.127)	(0.137)	(0.176)
312120	6,67%	-0.434***	0.419**	-0.618***
		(0.127)	(0.140)	(0.176)
325220	6,77%	-0.436***	0.412**	-0.620***
		(0.127)	(0.140)	(0.176)
325210	6,78%	-0.436***	0.411**	-0.620***
		(0.127)	(0.140)	(0.176)
325190	6,94%	-0.438***	0.400**	-0.622***
		(0.127)	(0.140)	(0.176)
332810	7,14%	-0.440***	0.385**	-0.625***
		(0.127)	(0.141)	(0.176)
325110	7,64%	-0.446***	0.348*	-0.632***
		(0.127)	(0.143)	(0.177)
331511	8,80%	-0.461***	0.263	-0.649***
		(0.129)	(0.148)	(0.178)
325189	10,60%	-0.484***	0.132	-0.674***
		(0.133)	(0.159)	(0.181)
331110	10,66%	-0.484***	0.127	-0.675***
		(0.133)	(0.159)	(0.181)
325313	10,70%	-0.485***	0.125	-0.676***
		(0.133)	(0.160)	(0.181)
322112	11,23%	-0.492***	0.0860	-0.683***
		(0.135)	(0.163)	(0.183)
327420	11,24%	-0.492***	0.0854	-0.684***
		(0.135)	(0.163)	(0.183)
321216	11,38%	-0.493***	0.0750	-0.686***
		(0.135)	(0.164)	(0.183)
322121	12,09%	-0.502***	0.0228	-0.696***

		(0.137)	(0.170)	(0.185)
327214	14,53%	-0.533***	-0.155	-0.731***
		(0.147)	(0.191)	(0.193)
331313	15,41%	-0.544***	-0.219	-0.743***
		(0.152)	(0.199)	(0.197)
322130	16,53%	-0.558***	-0.301	-0.759***
		(0.157)	(0.210)	(0.202)
325181	21,99%	-0.627**	-0.701**	-0.837***
		(0.190)	(0.269)	(0.232)
322111	22,41%	-0.632**	-0.731**	-0.843***
		(0.193)	(0.274)	(0.234)
322122	28,42%	-0.708**	-1.170***	-0.929***
		(0.236)	(0.345)	(0.275)
327310	29,78%	-0.725**	-1.269***	-0.949***
		(0.247)	(0.361)	(0.285)
327410	34,51%	-0.784**	-1.615***	-1.016**
		(0.284)	(0.420)	(0.321)
325120	43,95%	-0.903*	-2.305***	-1.151**
		(0.361)	(0.539)	(0.399)
N		650	650	650

Écarts-type entre parenthèses. * p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001

Tableau 6 : Taux de transfert de production en pourcentage (%) par industrie (code SCIAN)

332810	0,10	336510	145,81
327420	19,16	336990	146,50
312120	19,39	327215	168,44
331511	22,15	325210	178,69
321114	31,52	336410	231,46
325110	60,19	325190	251,67
322112	69,58	325189	253,64
331514	74,06	325314	268,51
324110	75,39	336110	290,28
331110	75,43	332510	302,43
336360	75,75	325410	370,69
326193	78,85	325320	395,83
322121	81,20	336310	423,35
321216	82,30	336120	453,26
321112	86,76	336390	474,16
321111	95,35	332210	490,32
325313	101,71	336350	499,74
331410	107,50	336330	504,07
311710	129,05	336320	566,70
336370	129,17	336340	622,42
325220	136,76		