



OECD Environment Working Papers No. 154

Les effets conjugués  
des prix de l'énergie et de la  
taxe carbone  
sur la performance  
économique  
et environnementale  
des entreprises françaises  
du secteur manufacturier

**Damien Dussaux**

<https://dx.doi.org/10.1787/b8ca827a-fr>

---

**Non classifié****Français - Or. Anglais**

29 janvier 2020

**DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT****LES EFFETS CONJUGÉS DES PRIX DE L'ÉNERGIE ET DE LA TAXE  
CARBONE SUR LA PERFORMANCE ÉCONOMIQUE ET  
ENVIRONNEMENTALE DES ENTREPRISES FRANÇAISES DU SECTEUR  
MANUFACTURIER****DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT  
DOCUMENT DE TRAVAIL N° 154**

Par Damien Dussaux (1)

*(1) Direction de l'Environnement de l'OCDE*

*Les documents de l'OCDE ne doivent pas être présentés comme exprimant les vues officielles de l'OCDE ou de ses pays membres. Les opinions exprimées et les arguments sont ceux des auteur(s).*

*Accord pour la publication par Rodolfo Lacy, Directeur, Direction de l'Environnement de l'OCDE.*

*Mots clés : Taxation du carbone, prix de l'énergie, réduction des émissions de carbone, performance des entreprises, compétitivité*

*Classification JEL : Q52, Q54, Q58*

**JT03457197**

Les documents de travail de l'OCDE ne doivent pas être présentés comme exprimant les vues officielles de l'OCDE ou de ses pays membres. Les opinions exprimées et les arguments employés sont ceux des auteurs.

Les documents de travail exposent des résultats préliminaires ou des travaux de recherche en cours menés par l'auteur/les auteurs et sont publiés pour stimuler le débat sur un large éventail de questions sur lesquelles l'OCDE travaille.

Les commentaires sur les documents de travail sont les bienvenus et peuvent être adressés à la Direction de l'Environnement, OCDE, 2 rue André-Pascal, 75775 Paris Cedex 16, France ou à l'adresse mél. suivante : [env.contact@oecd.org](mailto:env.contact@oecd.org).

---

Les Documents de travail de la Direction de l'Environnement sont disponibles à [www.oecd.org/environment/workingpapers.htm](http://www.oecd.org/environment/workingpapers.htm).

---

Le contenu ainsi que les données et toute carte qui y figurent sont sans préjudice du statut de tout territoire, de la souveraineté s'exerçant sur ce dernier, du tracé des frontières et limites internationales, et du nom de tout territoire, toute ville ou toute région.

Les données statistiques concernant Israël sont fournies par et sous la responsabilité des autorités israéliennes compétentes. L'utilisation de ces données par l'OCDE est sans préjudice du statut des hauteurs du Golan, de Jérusalem Est et des colonies de peuplement israéliennes en Cisjordanie aux termes du droit international.

## © OCDE (2020)

Vous êtes autorisés à copier, télécharger ou imprimer du contenu OCDE pour votre utilisation personnelle. Vous pouvez inclure des extraits des publications, des bases de données et produits multimédia de l'OCDE dans vos documents, présentations, blogs, sites Internet et matériel d'enseignement, sous réserve de faire mention de la source OCDE et du copyright.

Les demandes pour usage commercial ou de traduction devront être adressées à [rights@oecd.org](mailto:rights@oecd.org).

## *Résumé*

Ce papier estime l'effet des prix de l'énergie et de la taxation du carbone sur la performance environnementale et économique des entreprises. L'analyse utilise des données sur 8 000 entreprises représentatives du secteur manufacturier français et observées sur la période 2001-2016. Ce document montre que (i) bien qu'une augmentation de 10 % du prix de l'énergie diminue la consommation d'énergie de 6 % au niveau entreprise, cette augmentation n'a pas d'effet sur la création nette d'emplois au niveau sectoriel, mais génère des redéploiements de productions et de salariés des entreprises intensives en énergie vers d'autres plus économies en énergie. Les simulations montrent également que (ii) la taxe carbone, à son taux actuel, a permis de réduire les émissions de carbone en 2018 de 5 % soit 3,6 Mt de CO<sub>2</sub> par rapport à un scénario sans taxe, et (iii) qu'une augmentation supplémentaire de son taux de 45 € à 86 € par tonne de CO<sub>2</sub> générera une réduction des émissions de carbone de 8,7 % soit 6,2 Mt de CO<sub>2</sub> et un redéploiement pour 0,24 % des salariés du secteur manufacturier. Notre conclusion préconise de disposer de politiques complémentaires sur le marché du travail qui permettent de minimiser les coûts pour les travailleurs touchés et de faciliter les ajustements effectués par les entreprises.

**Mots clés :** Taxation du carbone, prix de l'énergie, réduction des émissions de carbone, performance des entreprises, compétitivité

**Classification JEL :** Q52, Q54, Q58

*Abstract*

The paper estimates the effect of energy prices and carbon taxation on firms' environmental and economic performance. The analysis uses data on 8 000 firms that are representative of the French manufacturing sector and observed during 2001-2016. The paper shows that (i) even though a 10% increase in energy prices causes a decline in energy use by 6% at the firm level, this increment has no effect on net employment at the industry level, but it motivates a reallocation of production and workers from energy-intensive to energy-efficient firms. Simulations shows also that (ii) the current carbon tax rate reduced manufacturing CO<sub>2</sub> emissions in 2018 by 5% or 3.6 Mt of CO<sub>2</sub> compared to a no-tax scenario, and that (iii) a further increase of carbon tax in France from its current rate of 45€ to 86€ per tonne of CO<sub>2</sub> would induce a reduction in carbon emissions by 8.7% or 6.2 Mt of CO<sub>2</sub> and a job reallocation for 0.24% of the workforce in the manufacturing sector. Our conclusion calls for complementary labour market policies that minimise costs on affected workers and ease between-firms adjustments in employment.

**Keywords:** carbon taxation, energy prices, carbon emissions reductions, firm performance, competitiveness

**JEL codes:** Q52, Q54, Q58

## *Table des matières*

<b>Résumé .....</b>	<b>3</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>4</b>
<b>Les effets conjugués des prix de l'énergie et de la taxe carbone sur la performance économique et environnementale des entreprises françaises du secteur manufacturier .....</b>	<b>8</b>
1. Introduction.....	9
2. Données .....	14
2.1. Source et définition .....	14
3. Effets directs de la variation des prix de l'énergie au niveau des entreprises .....	19
3.1. Méthodologie .....	19
3.2. Effets estimés de la variation des prix de l'énergie au niveau des entreprises.....	24
4. Effet net de la variation des prix de l'énergie sur l'emploi au niveau des branches d'activité .....	39
4.1. La variation des prix de l'énergie est sans effet sur la création nette totale d'emplois ..	39
4.2. Le redéploiement de la production compense l'effet négatif des prix de l'énergie sur l'emploi .....	41
5. Quantifier le redéploiement des salariés et la réduction des émissions .....	46
5.1. Contribution de la variation des prix de l'énergie au redéploiement des effectifs .....	46
5.2. Mesurer l'effet de la taxe carbone de 2013 à 2018 .....	47
5.3. Quantifier les effets à court terme d'une éventuelle hausse de la taxe carbone .....	50
6. Conclusions et travaux futurs possibles.....	55
<b>Références .....</b>	<b>58</b>
<b>Annexe A. Tableaux et graphiques complémentaires .....</b>	<b>62</b>
Statistiques de synthèse .....	62
Évolution de la variation inter-branches des prix des produits énergétiques.....	63
Variation intra-branche des prix des produits énergétiques.....	66
Synthèse des variations intra-branche et inter-branches des prix des produits énergétiques....	67
Effets propres à chaque branche de la variation des prix de l'énergie sur les émissions de carbone et les effectifs .....	68
<b>Annexe B. Test statistique de la faiblesse éventuelle des instruments .....</b>	<b>69</b>
<b>Annexe C. Tests de robustesse.....</b>	<b>70</b>
Résultats obtenus selon la méthode des moindres carrés ordinaires.....	70
Étude des hétérogénéités dues aux différences de taille des entreprises.....	72
Effets contemporains de la variation des prix de l'énergie .....	73
Analyse de sensibilité liée à la fusion des données au niveau des entreprises avec les données au niveau des établissements .....	75
Effets dynamiques de la variation des prix de l'énergie .....	77
La taille et l'intensité énergétique initiales de l'entreprise ont toutes deux une influence sur l'effet du prix de l'énergie .....	80
Régressions pondérées .....	83

## Tableaux

Tableau 1. Effet des prix de l'énergie sur les performances environnementale et économique...	28
Tableau 2. Effet des prix de l'énergie sur l'intensité énergétique et la substitution des facteurs.	29
Tableau 3. Effets hétérogènes sur la performance environnementale et sur la performance économique .....	32
Tableau 4. Effets hétérogènes sur l'intensité énergétique et la substitution des facteurs.....	33
Tableau 5. Innovation et indice des prix de l'énergie.....	34
Tableau 6: Prix de l'énergie et investissements de protection de l'environnement .....	36
Tableau 7. Effet des prix de l'énergie sur la création et destruction d'emplois au niveau des branches d'activité.....	40
Tableau 8 : Intensité énergétique et redéploiement de la production entre entreprises .....	43
Tableau 9. Corrélation entre IPEPF, intensité énergétique agrégée et flux d'emplois agrégés....	45
Tableau 10. Effet d'une hausse de la taxe carbone sur les émissions et les effectifs des entreprises constitutives de notre échantillon.....	53
Tableau 11. Extrapolation des effets d'une majoration de la taxe carbone sur les émissions de CO <sub>2</sub> et les redéploiements de salariés.....	55
Tableau A.1. Statistiques de synthèse pour l'échantillon constitué au niveau des entreprises....	62
Tableau A.2. Statistiques de synthèse pour l'échantillon constitué au niveau des établissements.....	63
Tableau A.3. Variation intra-branche des prix des produits énergétiques.....	66
Tableau A.4. Distribution du prix médian au niveau des branches identifiées par un code à trois chiffres.....	67
Tableau A.5. Élasticités des émissions de CO <sub>2</sub> et des effectifs, par branche .....	68
Tableau B.1. Régressions de première étape.....	69
Tableau C.1. Estimations MCO des performances économique et environnementale.....	70
Tableau C.2. Estimations MCO de l'intensité énergétique et de la substitution des facteurs .....	71
Tableau C.3. Effets hétérogènes sur la performance environnementale et sur la performance économique .....	72
Tableau C.4. Résultats sur les performances économique et environnementale quand les variables explicatives ne sont pas retardées .....	73
Tableau C.5. Résultats sur l'intensité énergétique et la substitution des facteurs quand les variables explicatives ne sont pas retardées .....	74
Tableau C.6. Effet des prix de l'énergie sur les performances environnementale et économique quand le seuil retenu pour l'emploi est 100 % .....	75
Tableau C.7. Effet des prix de l'énergie sur les performances environnementale et économique quand le seuil retenu pour l'emploi est 85 % .....	76
Tableau C.8. Effets dynamiques des prix de l'énergie sur les performances environnementale et économique .....	77
Tableau C.9. Effets dynamiques des prix de l'énergie sur la substitution des facteurs.....	78
Tableau C.10. Régressions de la première étape pour les effets dynamiques .....	79
Tableau C.11. Effets hétérogènes sur la performance environnementale et sur la performance économique .....	80
Tableau C.12. Effets hétérogènes sur l'intensité énergétique et la substitution des facteurs .....	82
Tableau C.13. Estimations DMC pondérées des performances économique et environnementale .....	83
Tableau C.14. Estimations DMC pondérées de l'intensité énergétique et de la substitution des facteurs .....	84

## Graphiques

Graphique 1 : Évolution du coût moyen de l'énergie.....	16
Graphique 2 : Intensité énergétique par branche d'activité.....	17
Graphique 3 : Intensité énergétique et coût moyen de l'énergie .....	17
Graphique 4 : Distribution des prix de l'électricité pour différentes tranches de consommation	18
Graphique 5 : Distribution des prix du gaz naturel pour différentes tranches de consommation.	18
Graphique 6. Distribution des prix de l'électricité et du gaz naturel dans chaque branche.....	23
Graphique 7. Variation des émissions de CO <sub>2</sub> dans chaque branche d'activité, pour une hausse du coût de l'énergie de 10 %.....	38
Graphique 8: Redéploiement des salariés dans chaque branche d'activité, pour une hausse du coût de l'énergie de 10 %.....	38
Graphique 9. Redéploiement des salariés due à la variation des prix de l'énergie en pourcentage des effectifs totaux.....	47
Graphique 10. Évolution de la taxe carbone mise en place en France .....	48
Graphique 11. L'effet de la taxe carbone sur le secteur manufacturier français .....	50
Graphique A.1. Évolution de la distribution du prix médian de l'électricité .....	63
Graphique A.2. Évolution de la distribution du prix médian du gaz naturel.....	64
Graphique A.3. Évolution de la distribution du prix médian du fioul domestique .....	64
Graphique A.4. Évolution de la distribution du prix médian du butane-propane.....	65

## Encadrés

Encadré 1. Variable instrumentale des prix de l'énergie à pondération fixe.....	22
Encadré 2. Tests de robustesse.....	26
Encadré 3. Effets des variations des prix de l'énergie sur le développement et l'adoption des technologies.....	34
Encadré 4. Redéploiement de l'emploi entre entreprises économes en énergie et entreprises énergivores .....	42

## Les effets conjugués des prix de l'énergie et de la taxe carbone sur la performance économique et environnementale des entreprises françaises du secteur manufacturier

### Résumé

Les taxes énergétiques font partie des principaux moyens d'action disponibles pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de carbone qui y sont associées. Plusieurs pays, dont la France, le Royaume-Uni et la Suède, ont ainsi mis en place une taxe carbone qui se traduit par une augmentation des prix de l'énergie. L'objet de la présente étude est de déterminer si ce type d'instrument économique permet effectivement de réduire les émissions de carbone et s'il a des répercussions sur l'emploi et la compétitivité des entreprises. Dans le cas de la France, il est d'autant plus important d'établir s'il existe un arbitrage entre performance environnementale et économique que l'emploi manufacturier a diminué de 26 % entre 2001 et 2016.

Ces travaux apportent un éclairage empirique sur les effets de l'évolution des prix de l'énergie sur la performance économique et environnementale des entreprises ainsi que sur l'emploi par branche d'activité, à partir d'un ensemble unique de données concernant 8 000 entreprises manufacturières françaises observées de 2001 à 2016. L'effet causal des prix de l'énergie est mis en évidence par une méthode de variables instrumentales.

Les résultats obtenus au niveau des entreprises montrent qu'une hausse de 10 % des prix de l'énergie fait baisser la consommation d'énergie de 6 % et le niveau des émissions de carbone de 9 %. Le nombre d'employés diminue également, mais dans une moindre mesure (-2%). Cependant, au niveau de l'industrie dans son ensemble, l'effet des prix de l'énergie sur la croissance nette de l'emploi est nul en raison du redéploiement de salariés entre entreprises. L'analyse montre en effet que l'augmentation des prix de l'énergie entraîne un redéploiement de la production et de la main-d'œuvre des entreprises intensives en énergie vers les entreprises économes en énergie.

Ces redéploiements sont cohérents avec les résultats observés au niveau des entreprises : en moyenne, le renchérissement de l'énergie s'accompagne de réductions de personnel dans les grandes entreprises (de plus de 50 salariés) à forte intensité énergétique, mais pas dans les petites entreprises qui restent sur le marché.

Il découle de cette étude deux implications principales en termes de politiques publiques.

Premièrement, les politiques de tarification du carbone qui font augmenter le coût de l'énergie provoquent un redéploiement de salariés entre entreprises. Le phénomène est relativement important dans la fabrication de produits métallurgiques de base, de produits alimentaires, de boissons, d'articles d'habillement, de matières plastiques ainsi que de machines et d'équipements. Ses effets redistributifs et les coûts supportés par les travailleurs licenciés imposent l'adoption de politiques complémentaires sur le marché du travail qui atténuent l'effet de ces ajustements d'effectifs interentreprises et soutiennent les travailleurs à travers la formation professionnelle et les allocations chômage.

Deuxièmement, les taxes énergétiques et autres dispositifs de tarification du carbone font sensiblement reculer les émissions de carbone. Dans le cas de la France, les simulations montrent (i) que le volume des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur manufacturier aurait été supérieur de 3,6 Mt en 2018, sans l'actuelle taxe carbone de 45 euros par tonne ; et (ii) qu'en élevant cette taxe à 86 euros la tonne de CO<sub>2</sub>, on obtiendrait une réduction supplémentaire de 6,2 Mt, ce qui serait conforme au deuxième budget carbone fixé dans la Stratégie nationale bas carbone pour 2019-23.

## 1. Introduction

Un recul de la consommation d'énergie pourrait apporter de multiples avantages aux individus et à la société, notamment à travers l'allègement des factures d'énergie et la baisse des émissions de carbone. C'est pourquoi des politiques visant à réduire la consommation d'énergie sont adoptées dans de nombreux pays. L'Union européenne, par exemple, qui s'est fixé pour objectif de réaliser 30 % d'économies d'énergie à l'horizon 2030, a proposé un ensemble de mesures que ses États membres pourraient prendre à cet effet. De son côté, la France a « élaboré un ambitieux cadre stratégique qui regroupe les questions de l'énergie et du climat pour aiguiller la transition énergétique à l'horizon 2030 et a adopté de nouveaux moyens d'action de premier plan, notamment des budgets/instruments de tarification du carbone et des incitations fiscales assortis de fonds publics considérables » [Agence internationale de l'énergie, 2017].

Parmi les moyens d'intervention visant à réduire la consommation d'énergie, ceux fondés sur les prix, comme les taxes sur les émissions ou les programmes de quotas d'émission échangeables, offrent un attrait certain dans la mesure où les variations des prix de l'énergie ont pour effet direct d'inciter les consommateurs à réduire leur consommation d'énergie [Jacobsen, 2015]. À l'inverse, le fait d'imposer des normes en élevant les coûts de la lutte contre la pollution [Holland, 2012] ou en orientant le choix des consommateurs [Gayer et Viscusi, 2013] peut avoir un impact négatif sur le bien-être de ces derniers. Les mesures fondées sur les prix n'en ont pas moins un coût pour les consommateurs, qui prend la forme d'une hausse du prix réel de l'énergie. Aussi les décideurs craignent-ils qu'en réaction, les entreprises ne réduisent le niveau de leur production ou de leurs effectifs<sup>1</sup>.

La manière dont les entreprises réagissent à la variation des prix de l'énergie donne une idée des conséquences à attendre à l'avenir du renforcement des instruments de tarification carbone qui feront monter les prix de l'énergie. Il importe donc d'analyser la façon dont les entreprises réagissent aux variations du prix de l'énergie afin d'en tirer des enseignements pour l'action des pouvoirs publics. Par exemple, les pertes économiques des entreprises affectées peuvent être limitées si l'évolution du prix de l'énergie les poussent à investir dans des technologies à haut rendement énergétique non exploitées jusqu'ici. En revanche, les pertes économiques pourraient s'avérer plus importantes si les entreprises réagissent en réduisant leur consommation d'énergie, leur production et leurs effectifs. Quantifier et qualifier les réactions des entreprises à une

<sup>1</sup> En effet, certaines taxes sont prélevées au niveau de la production d'énergie (par exemple, le Système d'échange de quotas d'émission de l'Union européenne, qui couvre notamment les centrales électriques), mais leurs coûts sont répercutés sur la facture des consommateurs [Sijm et al., 2008, Lise et al., 2010, Alexeeva-Talebi, 2011].

hausse du coût de l'énergie peut donc nous aider à mieux comprendre les conséquences économiques profondes des politiques climatiques. Dans le cas de la France, il importe d'autant plus d'étudier l'incidence de la taxe carbone que 80 % de son produit (3,8 milliards d'euros en 2016) a servi à financer le crédit d'impôt pour la compétitivité et l'emploi (CICE), qui, depuis 2013, constitue pour le gouvernement français un levier majeur pour diminuer le coût du travail<sup>2</sup>.

L'objet du présent document est de présenter deux analyses réalisées sur la base d'un ensemble unique de données, constitué à partir de diverses bases de données de l'office statistique français (INSEE) concernant les consommations et les dépenses d'énergie des entreprises (Enquête Annuelle sur les consommations d'énergie dans l'industrie, EACEI), leur situation financière (Fichier complet unifié de SUSE, FICUS, et Fichier approché des résultats ÉSANE, FARE), leur activité en matière de brevets (PATSTAT) et leurs investissements en matière de protection de l'environnement (enquête Antipol). L'ensemble de données ainsi obtenu est représentatif des entreprises manufacturières françaises de plus de 20 salariés.

La première analyse est menée au niveau microéconomique. Nous estimons les réactions à court terme des entreprises manufacturières françaises à des variations exogènes des prix de l'énergie. Pour ce faire, nous utilisons un indice des prix de l'énergie à pondération fixe comme variable instrumentale du coût moyen de l'énergie, à l'instar de [Linn, 2008] et [Sato et al., 2015]. En utilisant directement le coût moyen de l'énergie comme variable explicative, les estimations seraient faussées en raison des problèmes d'endogénéité potentielle qui sont associés à la présence de facteurs susceptibles d'agir simultanément sur la demande et sur les prix de l'énergie. L'indice est construit à partir des prix médians des combustibles considérés et de l'électricité observés au niveau des branches d'activité et, du fait de sa conception, ne prend pas en considération les effets que le changement technologique, la substitution ou les chocs sectoriels ont sur la demande de production [Linn, 2008], ce qui en fait une variable instrumentale appropriée pour analyser l'effet des coûts de l'énergie observés.

D'après les résultats obtenus au niveau microéconomique, une hausse des prix énergétiques de 10% fait baisser la consommation d'énergie de 6%<sup>3</sup>, et les émissions de carbone de 9%. Les entreprises françaises réagissent plus fortement à la variation des prix des combustibles fossiles qu'à celle des prix de l'électricité. Nous constatons également que la montée des prix de l'énergie peut s'accompagner d'une contraction des effectifs, mais ce uniquement dans les entreprises de plus de 50 salariés. Cependant, l'emploi étant moins élastique (-2% pour une hausse des prix de l'énergie de 10%) que la consommation d'énergie, nos résultats suggèrent que les entreprises touchées parviennent à atténuer leur intensité énergétique autrement qu'en diminuant leurs effectifs. À la différence des grandes entreprises, les structures de moins de 50 salariés (qui représentent 99 % des entreprises manufacturières françaises et 28 % des salariés

---

<sup>2</sup> Ces données proviennent du ministère français de la Transition écologique et solidaire. Toute entreprise française peut bénéficier du CICE, crédit d'impôt correspondant à 6 % des rémunérations versées ne dépassant pas 2.5 fois le salaire minimum.

<sup>3</sup> Cet effet estimé est plus large que les estimations rapportées dans les études antérieures portant sur les réactions à court terme des consommateurs industriels d'énergie aux variations des prix (voir [Labandeira et al., 2017] pour une analyse détaillée).

du secteur) ne procèdent pas à des réductions d'effectifs en réaction à l'augmentation du prix de l'énergie<sup>4</sup>.

L'une des principales contributions de ce rapport est de compléter l'analyse microéconomique par une analyse sectorielle. Premièrement, l'analyse microéconomique traite de l'incidence du prix de l'énergie sur le niveau des effectifs des entreprises qui opèrent sur le marché, mais ne traite pas des effets sur la création d'emplois à la faveur de l'arrivée d'entreprises nouvelles sur le marché. L'analyse microéconomique ne peut donc, du fait de sa conception, rendre compte de cette conséquence potentiellement favorable pour l'emploi. À l'inverse, l'analyse agrégée par secteur d'activité prend en compte à la fois la destruction et la création d'emplois et peut donner une idée de l'effet des prix de l'énergie sur la création nette d'emplois. Cependant, l'analyse sectorielle repose sur des hypothèses d'identification plus fortes que l'analyse microéconomique<sup>5</sup>.

Mais le principal avantage de l'analyse par secteur d'activité réside dans le fait que les données observées portent sur l'ensemble des entreprises manufacturières, alors que la consommation d'énergie n'est observée qu'au sein de l'échantillon d'entreprises constitué par les répondants de l'EACEI. Ces données exhaustives sur l'emploi nous permettent de mesurer la destruction et la création d'emplois pour l'ensemble des industries manufacturières suivant la méthode proposée par [Davis et Haltiwanger, 1992] et de calculer leur corrélation avec l'indice des prix de l'énergie. Cette analyse montre que la variation des prix de l'énergie n'agit pas sur l'emploi total des industries manufacturières. En d'autres termes, son incidence est nulle sur le niveau total des effectifs. Ce résultat découle, entre autres facteurs, de deux forces qui s'opposent : les emplois salariés (i) diminuent à court terme dans les entreprises de grande taille et les entreprises intensives en énergie, ainsi qu'il ressort de l'analyse microéconomique, tandis qu'ils (ii) augmentent dans les entreprises économies en énergie (y compris les nouvelles venues) sous l'effet du redéploiement de la production et des emplois entre entreprises.

Pour illustrer ces conclusions, nous réalisons trois exercices de simulation sur la base de nos estimations. Premièrement, nous mesurons la proportion d'emplois manufacturiers redéployés en raison de la variation des prix de l'énergie (5,8 % de variation annuelle en moyenne). Nous constatons qu'elle s'élève en moyenne à 0,25 %, mais que l'ampleur de ce redéploiement varie grandement d'une branche d'activité à l'autre : il touche surtout la fabrication de produits alimentaires (0,73 %), de produits métallurgiques de

---

<sup>4</sup> Les grandes entreprises et les PME diffèrent à d'autres égards. Les grandes entreprises réagissent en déposant davantage de brevets. D'autre part, elles consacrent une partie de leurs dépenses en capital à l'investissement dans des technologies dites « en bout de chaîne » – qui visent à neutraliser la pollution de l'air, de l'eau et par les déchets au point d'émission – a priori pour remplacer leurs technologies antipollution énergivores. Il est également possible que la baisse de l'intensité énergétique des entreprises passe par un redéploiement de la production entre établissements, mais les données dont nous disposons ne nous permettent pas de vérifier cette hypothèse ou de mesurer le phénomène.

<sup>5</sup> Nous considérons que l'indice des prix de l'énergie à pondération fixe est exogène au niveau microéconomique dans la mesure où aucune entreprise, prise individuellement, ne peut influer sur les prix des produits énergétiques utilisés dans la construction de l'indice.

base (0,61 %) et d'articles d'habillement (0,53 %), mais très peu la fabrication de produits pharmaceutiques (0,07 %), de papier (0,05 %) et de textiles (0,04 %).

Deuxièmement, nous estimons *a posteriori* l'incidence de la taxe carbone sur les émissions de CO<sub>2</sub> et les effectifs du secteur manufacturier français entre 2014 et 2018. Nous constatons qu'à son niveau actuel de 44,6 EUR par tonne de CO<sub>2</sub>, la taxe carbone a fait décroître les émissions de 3,6 Mt en 2018 sans incidence statistiquement significative sur le nombre total d'emplois.

Troisièmement, nous simulons l'effet de la taxe carbone française sur les émissions de CO<sub>2</sub> et les effectifs de 19 branches d'activité. Nous examinons les conséquences d'une multiplication par deux de son niveau actuel, qui est de 44,6 EUR par tonne. Partant du principe que notre échantillon d'entreprises est représentatif du secteur manufacturier français, nous constatons qu'une telle hausse de la taxe carbone diminuerait le volume total des émissions de CO<sub>2</sub> de 6,2 Mt et causerait le redéploiement de 0,24 % des emplois manufacturiers<sup>6</sup>. La redistribution des emplois est relativement importante dans les branches de la fabrication de produits métallurgiques de base, de produits alimentaires, de boissons, d'articles d'habillement, de matières plastiques et de machines et d'équipements, puisqu'elle touche au moins 0,3 % des effectifs. Ces chiffres indiquent que la taxe carbone française peut sensiblement réduire les émissions de carbone, mais au prix d'un redéploiement significatif de main-d'œuvre entre les entreprises et les branches d'activité, qui devrait toutefois rester sans incidence sur l'emploi total.

Nos travaux contribuent à la littérature consacrée à la relation entre prix et consommation d'énergie. De manière générale, les études empiriques font apparaître une élasticité non négligeable de la consommation par rapport aux prix des combustibles et de l'électricité, surtout à long terme [Houthakker, 1951 ; Taylor, 1975 ; Bohi et Zimmerman, 1984 ; Al-Sahlawi, 1989 ; Espey, 1996 ; Brons et al., 2008 ; Havranek et al., 2012 ; Labandeira et al., 2017]. À notre connaissance, aucune ne décrit précisément la manière dont les entreprises réduisent leur consommation d'énergie.

Ce rapport contribue également à la littérature portant sur l'effet du prix de l'énergie sur l'adoption des technologies d'économie d'énergie par les entreprises manufacturières [Pizer et al., 2001 ; Anderson et Newell, 2004]. Nous y contribuons à notre tour en estimant l'effet du prix de l'énergie sur le nombre de dépôts de brevets et sur les dépenses en capital relevant de la lutte contre la pollution.

De manière plus générale, la présente étude vient s'ajouter au nombre grandissant de travaux visant à évaluer l'incidence des politiques environnementales sur la performance environnementale des entreprises [Greenstone et al., 2012 ; Walker, 2013 ; Martin et al., 2014 ; Wagner et al., 2014 ; Flues et Lutz, 2015 ; Gerster, 2015 ; Pertrick et Wagner, 2018]. En général, les entreprises réagissent aux politiques environnementales en se détournant des intrants énergétiques visés et en réduisant leurs émissions de CO<sub>2</sub>. Les résultats concernant les arbitrages entre performance environnementale et économique varient significativement d'une étude à l'autre. Deux facteurs principaux expliquent ces différences. Premièrement, les études antérieures n'utilisent pas les mêmes mesures de performance économique. Deuxièmement, l'hétérogénéité des entreprises et des activités n'est généralement pas prise en compte. Nous y remédions ici en examinant

---

<sup>6</sup> Dans notre simulation, nous tenons compte du fait que les entreprises grandes consommatrices d'énergie qui relèvent du SEQE-UE ou sont exposées au risque de fuite de carbone paient la taxe carbone à un taux réduit.

une multiplicité d'indicateurs de la performance économique (production, emploi, investissements et dépôts de brevets) et dégageons les différences majeures qui existent entre grandes, moyennes et petites entreprises.

Nos travaux présentent des similitudes avec ceux de [Marin et Vona, 2017], qui analysent l'incidence des prix de l'énergie sur les effectifs et la performance environnementale des établissements manufacturiers français. Nos travaux diffèrent toutefois à plusieurs égards. Premièrement, [Marin et Vona, 2017] se concentrent sur la manière dont les entreprises « survivantes » réagissent à la variation des prix de l'énergie, alors que nous examinons également l'effet que la variation des prix de l'énergie a sur la création nette d'emplois au niveau des branches d'activité et mettons en relief l'importance du redéploiement de la production. Deuxièmement, nous retenons l'entreprise, et non l'établissement, comme unité d'observation. Cela permet d'analyser l'effet du prix sur le niveau réel de la production, des investissements, de l'emploi et des dépôts de brevets et d'étudier l'hétérogénéité entre PME et grandes entreprises<sup>7</sup>. Troisièmement, en plus de mesurer l'élasticité-prix de la consommation d'énergie et de l'emploi, nous décrivons la manière dont les entreprises réduisent leur consommation d'énergie par unité de production en examinant leurs choix énergétiques, la substitution des facteurs ainsi que l'investissement dans les technologies de lutte contre la pollution. Quatrièmement, nous réalisons des tests pour établir l'existence éventuelle d'effets hétérogènes du prix de l'énergie sur plusieurs dimensions : l'intensité énergétique et la taille des entreprises<sup>8</sup>. Enfin, sur la base d'estimations économétriques propres à chaque branche d'activité, nous simulons les effets d'une hausse de la taxe carbone française sur les effectifs et les émissions de CO<sub>2</sub> de 19 branches d'activité<sup>9</sup>. Nous pensons que ces travaux apporteront aux décideurs des éléments utiles pour élaborer des politiques environnementales et économiques efficaces.

Le présent document est organisé comme suit. La section 2 contient une présentation succincte de notre ensemble unique de données, puis la section 3 une analyse empirique des effets du prix de l'énergie sur la performance environnementale, la performance économique, la substitution des facteurs et l'adoption de technologies au niveau des entreprises présentes sur le marché. La section 4 est consacrée à l'analyse de l'effet net que la variation des prix de l'énergie a sur la création d'emplois au niveau des branches d'activité. Dans la section 5, nous recensons les activités dans lesquelles la variation des prix de l'énergie a entraîné un redéploiement des effectifs manufacturiers, mesurons les effets de la taxe carbone pour la période 2014-18 et simulons l'impact qu'un doublement du taux de la taxe carbone aurait sur les émissions de CO<sub>2</sub> et l'emploi dans les industries manufacturières. Enfin, la section 6 présente les conclusions de l'étude.

<sup>7</sup> De plus, nous mesurons l'investissement et nous appuyons sur des données plus récentes que [Marin et Vona, 2017], qui couvrent la période 1997-2010.

<sup>8</sup> [Marin et Vona, 2017] explorent également l'hétérogénéité mais estiment les coefficients sur des échantillons distincts tandis que nous estimons les effets hétérogènes sur un seul et même échantillon afin d'éviter des problèmes de sélection.

<sup>9</sup> [Marin et Vona, 2017] effectuent une simulation fondée sur une taxe carbone de 56 EUR/t, mais ne fournissent aucun ordre de grandeur par branche d'activité.

## 2. Données

### 2.1. *Source et définition*

Notre principal jeu de données se rapporte à un panel de 8 000 entreprises françaises observées de 2001 à 2016 et représentatives de l'intégralité du secteur manufacturier, hors industries du tabac, des armements et des munitions<sup>10</sup>. Nous obtenons cet échantillon en fusionnant deux ensembles de données décrits ci-après : le premier porte sur les consommations d'énergie, le second contient des données financières.

Les données relatives aux dépenses et consommations d'énergie proviennent de l'enquête annuelle sur les consommations d'énergie dans l'industrie (EACEI), que l'INSEE réalise pour obtenir des informations sur la consommation d'électricité, de gaz naturel, de charbon, de pétrole et autres produits énergétiques au niveau des établissements. Nous combinons les données sur les consommations d'énergie avec les facteurs d'émissions de CO<sub>2</sub> fournis par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) pour calculer les émissions de CO<sub>2</sub> imputables à la combustion de carburants fossiles. Comme les données de consommation d'énergie sont disponibles au niveau des établissements et que les données de performance économique sont au niveau des entreprises, nous agrégeons les données énergétiques des établissements afin d'obtenir des données au niveau des entreprises.

Cette agrégation s'effectue de manière simple et directe dans le cas des entreprises à établissement unique. Pour les entreprises à établissements multiples, il faudrait idéalement disposer de données sur la totalité des établissements. Nous procédons comme suit afin de déterminer si tel est le cas. Premièrement, nous calculons la somme des salariés des établissements pour lesquels des données énergétiques sont disponibles à partir de la liste des établissements manufacturiers établie par l'INSEE. Deuxièmement, nous comparons ce chiffre au total des effectifs des entreprises. S'il représente au moins 90 % des effectifs totaux, nous considérons que la somme des dépenses et consommations d'énergie des établissements d'une entreprise correspond au total des dépenses et consommations d'énergie de ladite entreprise. Ce seuil de 90 % représente un arbitrage entre (i) réduire au minimum l'erreur commise dans la mesure du total des consommations d'énergie des entreprises et (ii) maximiser le nombre des observations de façon à obtenir un échantillon représentatif. Un seuil plus élevé amoindrirait l'erreur de mesure des consommations d'énergie totales des entreprises, mais ferait aussi disparaître des entreprises de notre échantillon. En choisissant un seuil trop élevé, on risquerait de laisser de côté des entreprises qui possèdent des établissements non énergivores, comme des bâtiments de bureaux, qui ne figureraient jamais dans l'échantillon constitué aux fins de l'EACEI<sup>11</sup>.

L'EACEI contient tous les établissements de plus de 250 salariés. Les établissements de 20 à 249 salariés sont sélectionnés par tirage aléatoire sur deux strates : la classe d'effectifs et l'emplacement géographique de l'établissement. Les établissements de

---

<sup>10</sup> Nous incluons dans nos estimations quelques entreprises de l'industrie de la cokéfaction et du raffinage (NACE 19), mais leur nombre est trop faible pour fournir des statistiques représentatives de cette industrie.

<sup>11</sup> Dans les tableaux C.6. et C.7. présentés en annexe, nous appliquons respectivement un seuil de 100 % et 85 % et montrons que les résultats ainsi obtenus ne sont pas sensibles au seuil de 90 %.

moins de 20 salariés ne sont pas inclus dans l'échantillon. Le taux de réponse à l'enquête est très élevé : par exemple, il était de 90 % dans la campagne 2014.

Les données relatives au chiffre d'affaires, au nombre de salariés et à l'investissement total proviennent du recensement effectué par le ministère français des Finances au niveau des entreprises. Nous déflatons la production à l'aide des indices des prix à la production établis par l'INSEE pour les activités associées à un code à deux chiffres. Les données sur les dépôts de brevets sont extraites de la base de données PATSTAT. Nous établissons la correspondance entre les dépôts de brevets et les entreprises à l'aide de la base de données Orbis (Bureau van Dijk)-PATSTAT.

Pour analyser l'effet du prix de l'énergie sur l'investissement dans les technologies de lutte contre la pollution, nous nous fondons sur les données obtenues au niveau des établissements dans le cadre de l'enquête Antipol que l'INSEE réalise chaque année. Dans cette enquête, les établissements sont notamment interrogés sur le montant des investissements qu'ils consacrent à la lutte contre la pollution. Depuis quelques années, les établissements de plus de 250 salariés ont l'obligation d'y participer. Les établissements qui emploient entre 20 et 249 personnes sont sélectionnés par tirage aléatoire en fonction de leur activité économique et du nombre de leurs salariés. Les investissements sont ventilés par milieu écologique (air, eau, déchets et sol). L'enquête établit également une distinction entre technologies en bout de chaîne et technologies intégrées. Comme il y a nettement moins de données disponibles sur les technologies intégrées que sur les technologies en bout de chaîne, nous nous focalisons uniquement sur ces dernières.

On notera que l'échantillon de données employé pour déterminer l'effet du prix de l'énergie sur les investissements pour la protection de l'environnement diffère de l'échantillon principal. Premièrement, il se rapporte aux établissements et non aux entreprises ; deuxièmement, il y a moins de données disponibles sur les investissements que sur les consommations d'énergie. Le jeu de données sur les investissements est donc moins volumineux que notre ensemble de données principal sur les entreprises. Des statistiques de synthèse sont disponibles à l'annexe A.

Le coût de l'énergie varie fortement selon les entreprises et a considérablement augmenté récemment. Le Graphique 1 illustre l'évolution de son niveau moyen pendant la période étudiée. Le coût de l'énergie est passé en moyenne de 500 euros par tonne d'équivalent pétrole (tep) en 2001 à 900 EUR/tep en 2016. Cette hausse globale est cohérente avec l'évolution du prix du pétrole brut.

Le Graphique 2 indique l'intensité énergétique de différentes activités manufacturières associées à un code à deux chiffres<sup>12</sup>. Le classement des branches d'activité obtenu n'est pas surprenant. Celles dont l'intensité énergétique est la plus faible sont l'industrie du cuir, la fabrication d'ordinateurs et la fabrication d'équipements électriques et de machines, tandis que parmi les plus énergivores figurent les produits minéraux non métalliques, les produits chimiques, les produits métallurgiques de base et le papier.

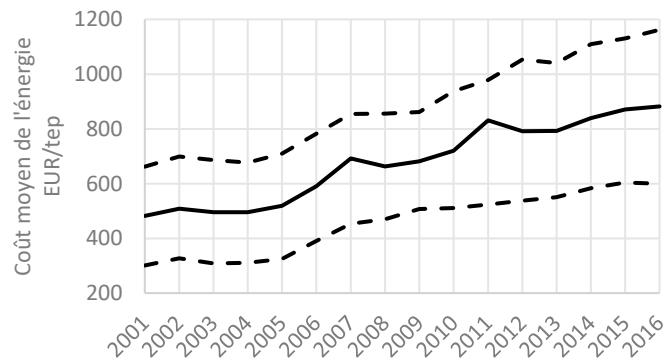
Sur le Graphique 3, l'intensité énergétique (axe des ordonnées) est comparée au coût moyen de l'énergie (axe des abscisses). Le graphique montre que l'intensité énergétique et le coût de l'énergie varient fortement d'un secteur d'activité à l'autre. Le coût de l'énergie est le plus élevé dans la fabrication d'articles en bois (820 EUR/tep), de produits minéraux non métalliques, de produits métalliques et de meubles

<sup>12</sup> Moyennes calculées pour la période 2001-16.

(750 EUR/tep), tandis qu'il est le plus faible dans la fabrication de produits alimentaires et de produits métallurgiques de base (570 EUR/tep). L'énergie coûte 26 % plus cher aux entreprises qui fabriquent des produits minéraux non métalliques qu'à celles qui fabriquent des produits métallurgiques de base alors que l'intensité énergétique est identique pour ces deux activités. Le constat est le même lorsque l'on compare les activités de fabrication d'articles en bois et de produits alimentaires, puisque l'écart du coût de l'énergie atteint 42 % en moyenne.

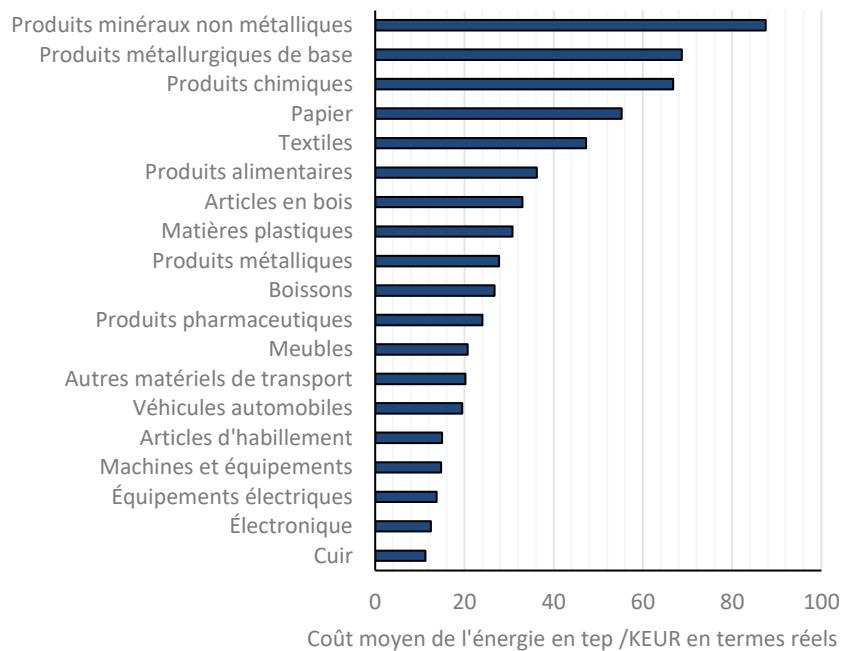
Pour quelles raisons le coût de l'énergie varie-t-il autant d'une branche d'activité à l'autre ? Le Graphique 4 et le Graphique 5 apportent des éléments de réponse en illustrant respectivement la distribution des prix de l'électricité et du gaz naturel pour différentes tranches de dépenses d'énergie. D'importantes remises quantitatives sont pratiquées. Dans les deux cas, nous observons que le coût diminue de façon monotone à mesure que le volume acheté grossit. Ainsi, les entreprises payent l'électricité 100 EUR/MWh en moyenne lorsqu'elles consomment moins de 50 MWh et 55 EUR/MWh lorsqu'elles consomment plus de 5 000 MWh. Dans le cas du gaz, elles sont facturées en moyenne 40 EUR/MWh lorsque leurs achats sont inférieurs à 500 MWh et 25 EUR/MWh lorsqu'ils dépassent 50 000 MWh.

**Graphique 1 : Évolution du coût moyen de l'énergie**

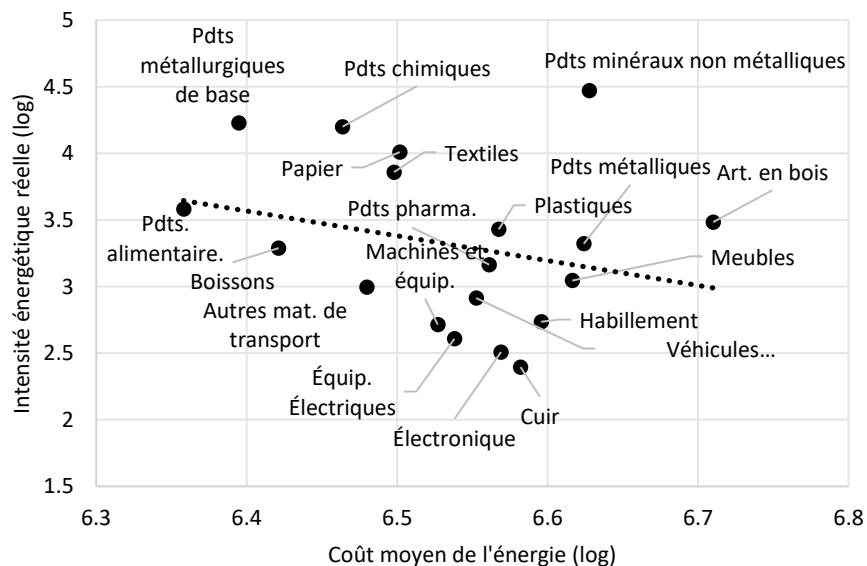


*Note : Les lignes en pointillés représentent les 10<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup> centiles de la distribution.*

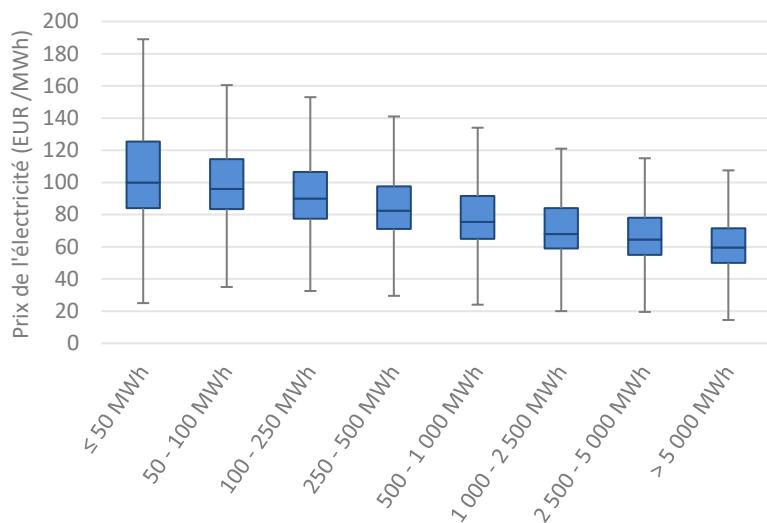
*Source : Calculs des auteurs.*

**Graphique 2 : Intensité énergétique par branche d'activité**

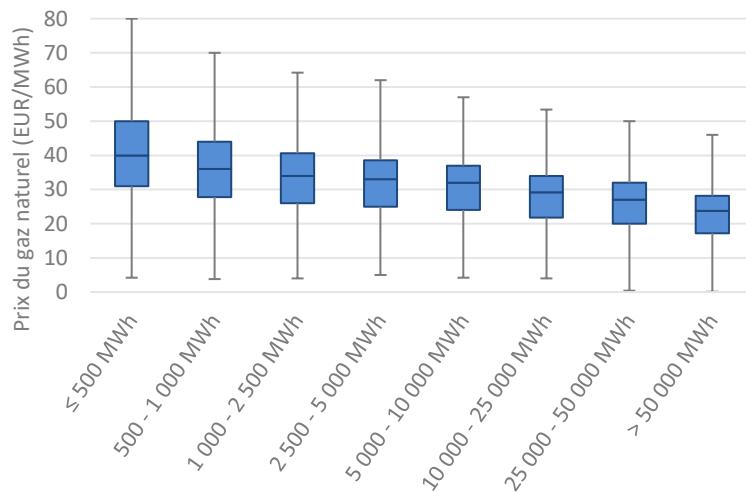
Note : Moyennes calculées pour 2001-16. Source : Calculs des auteurs.

**Graphique 3 : Intensité énergétique et coût moyen de l'énergie**

Note : Moyennes calculées pour 2001-16. Source : Calculs des auteurs.

**Graphique 4 : Distribution des prix de l'électricité pour différentes tranches de consommation**

Note : Calculs des auteurs effectués sur la base des données de l'EACEI.

**Graphique 5 : Distribution des prix du gaz naturel pour différentes tranches de consommation**

Note : Calculs des auteurs effectués sur la base des données de l'EACEI.

Dans la présente étude, nous nous intéressons aux quatre principales sources d'énergie employées dans le secteur manufacturier français : électricité, gaz naturel, fioul domestique et butane-propane. La part de l'électricité dans la consommation totale d'énergie d'une entreprise manufacturière moyenne s'élève à 58 %, contre 28 % pour le gaz naturel, 6 % pour le fioul domestique et 4 % pour le butane-propane. Par ailleurs, ces quatre produits énergétiques représentent plus de 95 % de la consommation totale

d'énergie de 90 % des entreprises manufacturières françaises<sup>13</sup>. Afin de conserver le nombre initial d'observations dans notre échantillon et dans un souci de clarté, nous limitons notre analyse à ces quatre produits énergétiques<sup>14</sup>. Ce choix n'a pas d'incidence sur nos résultats. Les tableaux A.1 et A.2 contiennent respectivement les statistiques descriptives relatives à l'ensemble de données principal et au jeu de données sur les investissements.

### 3. Effets directs de la variation des prix de l'énergie au niveau des entreprises

#### 3.1. Méthodologie

##### 3.1.1. Modèle économétrique

Pour estimer l'effet à court terme d'une variation du coût de l'énergie sur les performances économique et environnementale et sur l'adoption des technologies d'économies d'énergie des entreprises qui opèrent sur le marché, nous utilisons le modèle suivant :

$$y_{it} = \beta_0 + \beta_1 \text{Cout}_{it-1} + \beta_2 X_{it-1} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

où  $y$  est une variable à expliquer pour l'entreprise  $i$  à l'année  $t$ , par exemple la consommation d'énergie, le nombre de salariés, la production réelle, etc. ;  $\text{Cout}$  est le log du coût moyen de l'énergie, mesuré par le rapport entre les dépenses de produits énergétiques (électricité, gaz naturel, fioul domestique et butane-propane), exprimées en milliers d'euros, et la quantité achetée correspondante, exprimée en tep ;  $X$  est un vecteur des variables de contrôle au niveau des entreprises, qui comporte une variable binaire égale à 1 quand l'entreprise est assujettie au Système d'échange de quotas d'émission (SEQE) de l'Union européenne à partir de 2005, et l'âge moyen des établissements de l'entreprise ;  $\mu_i$  représente les effets fixes au niveau de l'entreprise,  $\gamma_t$  les effets fixes par année et  $\varepsilon_{it}$  le terme d'erreur.

Nous estimons l'équation (1) à l'aide d'un estimateur à effets fixes qui nous permet de neutraliser les caractéristiques propres aux entreprises et indépendantes du temps  $\mu_i$  qui pourraient être corrélées à l'indice des prix de l'énergie et aux variables à expliquer. Cette méthode nous permet de tenir compte des différences entre entreprises de branches d'activité aux intensités énergétiques très différentes. Par exemple, par rapport aux petites entreprises de l'industrie de l'habillement, les grandes entreprises de l'industrie chimique ont évidemment des effectifs plus importants, une consommation d'énergie plus élevée, et n'achètent pas leurs produits énergétiques aux mêmes prix.

Les effets fixes annuels  $\gamma_t$  neutralisent les variations de la demande de consommation et des prix des produits énergétiques au niveau de la France, qui ont un impact sur les résultats de toutes les entreprises françaises ainsi que sur les prix des produits énergétiques utilisés pour calculer l'indice des prix de l'énergie. Une variable de contrôle rend compte de l'appartenance éventuelle au SEQE car les entreprises assujetties à ce système ont une intensité carbone plus élevée et peuvent prétendre au taux réduit de la

<sup>13</sup> De plus, il existe une corrélation de 0,98 entre le coût moyen de l'énergie, tous produits énergétiques confondus, et celui calculé pour les quatre produits énergétiques retenus.

<sup>14</sup> Nos résultats ne dépendent pas de cette restriction.

taxe sur les produits énergétiques<sup>15</sup>. Toutes les variables explicatives sont retardées d'une année pour rendre compte du temps dont les entreprises ont besoin pour réagir à de nouveaux prix moyens des produits énergétiques<sup>16</sup>. Enfin, nous calculons des erreurs types robustes clusterisées au niveau de l'entreprise.

Il est possible que la réaction des entreprises à la hausse des prix de l'énergie diffère selon leur taille. Par exemple, [Sadorsky, 2008] montre que l'effet des variations des prix du pétrole est maximal sur les entreprises de taille moyenne, par rapport aux petites et aux grandes entreprises<sup>17</sup>. Pourquoi le coût de l'énergie aurait-il un impact différent sur des entreprises de tailles différentes ? Certaines études soutiennent l'idée que les grandes entreprises ont davantage de ressources et de moyens, réalisent des économies d'échelle, et ont une meilleure performance économique mesurée par la productivité [Caves et Barton, 1990] ou la rentabilité [Bradbard et Ross, 1989]. D'après cette littérature, les petites entreprises sont plus exposées à la hausse des prix de l'énergie car il est moins facile pour elles d'adapter la répartition de leurs moyens de production. Au contraire, d'autres études publiées concluent que les petites entreprises seraient plus productives que les grandes du fait de leur meilleur potentiel d'innovation [Hansen, 1992 ; Acs et al., 1991] et parce qu'elles sont confrontées à moins de problèmes d'organisation [Aiginger et Tichy, 1991]. Comme 90 % des entreprises du secteur manufacturier français sont des PME, toute différence entre les petites et les grandes entreprises a des implications importantes sur en termes de politiques publiques<sup>18</sup>.

Pour tester les effets hétérogènes du prix de l'énergie, nous augmentons le modèle (1) avec deux termes d'interaction : (i) une interaction entre le coût moyen de l'énergie et une variable binaire *Petite<sub>i0</sub>* égale à 1 si l'entreprise emploie moins de 50 personnes au cours de la première année d'observation ; (ii) une interaction entre le coût moyen de l'énergie et une variable binaire *Grande<sub>i0</sub>* égale à 1 si l'entreprise emploie plus de 250 personnes au cours de la première année d'observation. Le modèle augmenté peut être formulé comme suit :

$$y_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Cout_{it-1} + \alpha_2 Cout_{it-1} \times Petite_{i0} + \alpha_3 Cout_{it-1} \times Grande_{i0} + \alpha_4 X_{it-1} + \mu_i + \gamma_t + u_{it} \quad (2)$$

<sup>15</sup>Une autre solution consiste à faire interagir la variable indicatrice du SEQE avec nos variables binaires temporelles x branche pour tenir compte de la variation du prix de l'électricité qui pourrait être causée par le SEQE. Avec cette méthode, nous obtenons des estimations très similaires, disponibles sur demande.

<sup>16</sup>Quand les variables explicatives ne sont pas retardées, nous obtenons des résultats similaires pour la consommation d'énergie et l'emploi, comme indiqué dans le Tableau C.4. Les combustibles fossiles sont davantage remplacés par l'électricité que dans notre modèle de référence. Dans les Tableaux C.8 et C.9, nous allons plus loin encore en estimant un modèle dynamique qui contient deux retards pour les variables explicatives, en plus de leur valeur contemporaine. Il ressort de ce modèle que la plupart des effets se produisent au premier retard.

<sup>17</sup>Dans Sadorsky (2008), c'est le montant des recettes réelles, en millions USD, qui permet d'estimer la taille des entreprises : les petites sont celles dont le chiffre d'affaires annuel est inférieur ou égal à 140,07 millions USD ; les grandes sont celles dont le chiffre d'affaires annuel est égal ou supérieur à 5,38 milliards USD ; les moyennes sont celles dont le chiffre d'affaires annuel est strictement compris entre 140,07 millions USD et 5,38 milliards USD.

<sup>18</sup>Dans notre échantillon, 80 % des entreprises sont des PME. La Commission européenne et l'administration française définissent les PME comme les entreprises employant moins de 250 personnes.

En estimant le modèle sur un échantillon unique avec les termes d’interaction, nous nous assurons de ne pas introduire un quelconque biais de sélection de l’échantillon comme cela peut être le cas lorsque des régressions sont effectuées séparément sur différents groupes d’entreprises.

### 3.1.2. *Variable instrumentale*

Nous estimons le modèle (1) et le modèle (2) selon la méthode des doubles moindres carrés (DMC). Cette méthode est indiquée dans notre cas car l’effet de  $Cout_{it}$  se confond avec ceux des facteurs non observés qui causent la variation de  $y_{it}$  et sont potentiellement corrélés à  $Cout_{it}$ . La méthode des DMC qui permet de récupérer l’effet causal de  $Cout_{it}$  nécessite l’utilisation d’une variable instrumentale. Ici, c’est un indice des prix de l’énergie exogène qui est choisi comme instrument du coût de l’énergie (voir Encadré 1).

Nous observons une variation significative du coût moyen de l’énergie au cours du temps dans le Graphique 1 et une variation significative du coût de l’énergie d’une branche à une autre dans le Graphique 2. Cependant, pour identifier l’effet du coût de l’énergie, il faut une variation intra-entreprise à la fois du coût moyen de l’énergie et de l’indice des prix de l’énergie au cours du temps. Pour savoir si c’est le cas, nous redimensionnons les deux variables en soustrayant leur moyenne intra-entreprise. Puis nous calculons l’écart-type des deux variables diminuées de leur moyenne. Il est de 20 % pour le coût moyen de l’énergie et de 15 % pour l’indice des prix de l’énergie. Nous devrions donc avoir suffisamment de variation intra-entreprise pour estimer nos modèles.

### Encadré 1. Variable instrumentale des prix de l'énergie à pondération fixe

#### Pertinence

Dans les équations (1) et (2),  $y_{it}$  et  $Cout_{it}$  sont choisis simultanément par l'entreprise. Chaque entreprise peut faire évoluer sa facture énergétique en modifiant sa consommation de produits énergétiques, son niveau de production ou les technologies qu'elle utilise. Par conséquent, utiliser la méthode des moindres carrés ordinaires (MCO) pour estimer par régression la consommation d'énergie ou une autre variable expliquée au niveau de l'entreprise en fonction du coût moyen de l'énergie produit une estimation biaisée de l'effet du prix de l'énergie, même en tenant compte d'effets fixes. Par exemple, on peut s'attendre à ce que la méthode des MCO produise une estimation biaisée à la hausse puisque les facteurs non observés que sont l'efficacité de l'entreprise ou sa capacité de gestion sont corrélés négativement à la consommation d'énergie et à  $Cout_{it}$ .

Le Graphique 6, qui montre la distribution des prix de l'électricité et du gaz naturel pour chaque branche associée à un code à trois chiffres, illustre le fait que les entreprises d'une même branche d'activité sont confrontées à des prix très différents. Ces différences sont causées par les remises quantitatives. Elles illustrent le problème de l'utilisation du coût de l'énergie au niveau de l'entreprise dans une régression de type MCO.

Pour remédier à ce biais de simultanéité, nous utilisons une variation exogène des prix des produits énergétiques comme variable instrumentale du coût de l'énergie. Plus précisément, nous suivons [Sato et al., 2015] pour calculer un indice des prix de l'énergie à pondération fixe :

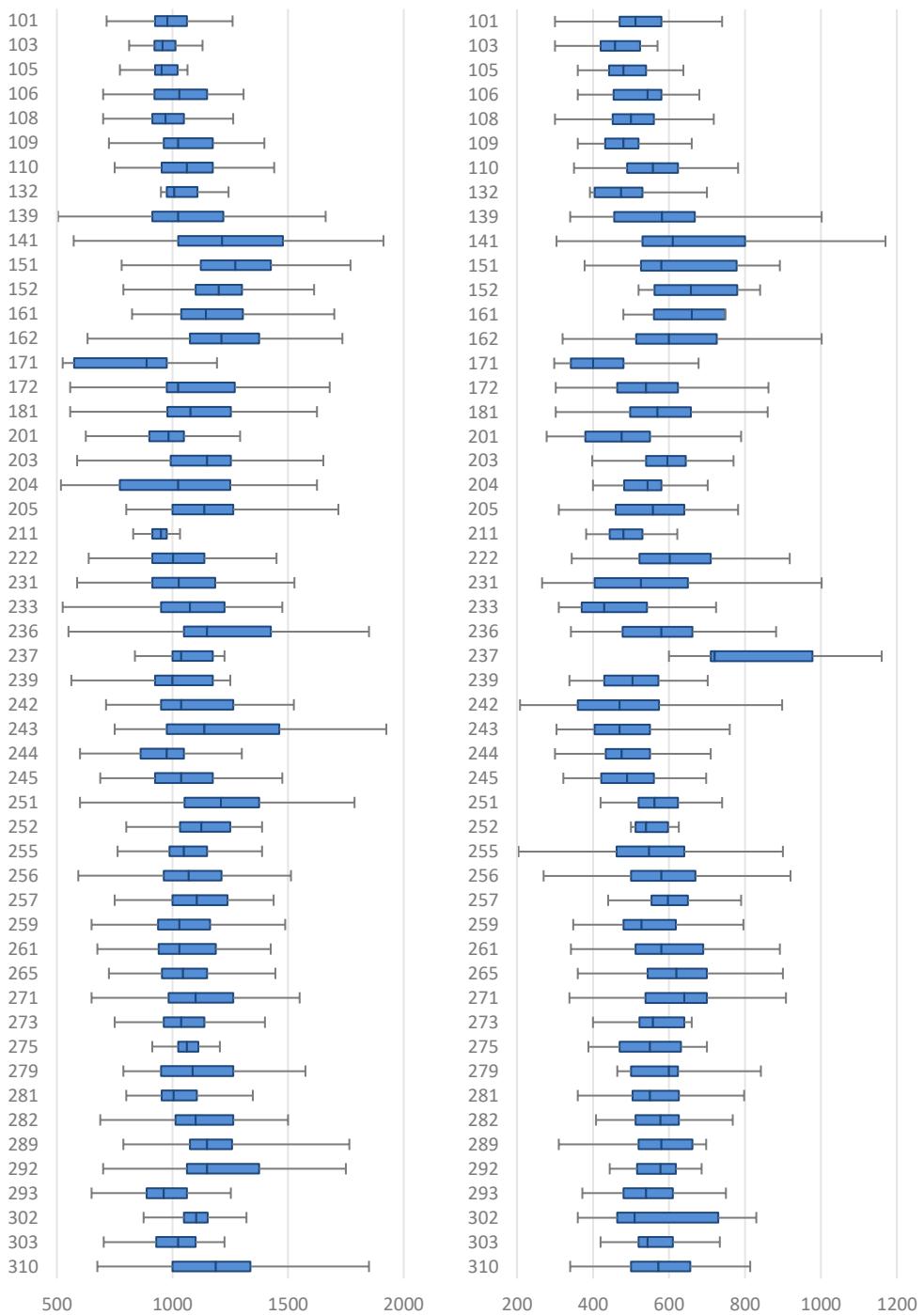
$$FEPI_{it} = \sum_j w_{i0}^j \ln(p_{kt}^j) \quad (3)$$

où  $w_{i0}^j$  est la part du produit énergétique  $f$  dans la consommation totale d'énergie de l'entreprise  $i$  à l'année 0 (avant la période couverte par l'étude), et  $p_{kt}^j$  est le prix médian du produit énergétique  $f$  dans la branche au code à trois chiffres  $k$  dont relève l'entreprise  $i$  à l'année  $t$ .<sup>19</sup>

Recourir à des coefficients de pondération relatifs à une période antérieure à la période étudiée présente deux avantages<sup>20</sup>. Premièrement, on peut agréger les différents prix au niveau des branches d'activité en un indice des prix de l'énergie au niveau de l'entreprise. Deuxièmement, les décisions de l'entreprise  $i$  au cours de la période étudiée ne sont pas corrélées à ces coefficients de pondération puisque ceux-ci, fixes, dépendent de données relatives aux années qui ont précédé la période étudiée.

<sup>19</sup> [Linn, 2008] utilise un indice des prix de l'énergie à pondération fixe avec des coefficients de pondération calculés au niveau de chaque État des États-Unis. Ici, la consommation totale d'énergie est simplement la somme des consommations d'électricité, de gaz naturel, de butane-propane et de fioul domestique.

<sup>20</sup> L'année qui précède la période étudiée peut varier selon les entreprises. Seules les observations relatives aux années postérieures à cette année-là sont utilisées dans l'échantillon de l'estimation.

**Graphique 6. Distribution des prix de l'électricité et du gaz naturel dans chaque branche**

Note : Prix de l'électricité en EUR/tep à gauche et prix du gaz naturel en EUR/tep à droite. 10<sup>e</sup> centile, écart-type, médiane et 90<sup>e</sup> centile pour l'année 2015

### Exogénéité

La variation intra-entreprise vient donc des prix des produits énergétiques au niveau des branches d'activité. Au contraire des prix des produits énergétiques réellement payés par l'entreprise  $i$ , les médianes des prix des produits énergétiques  $p_{kt}$  au niveau des branches d'activité peuvent être supposées exogènes à l'entreprise  $i$ . La validité de l'indice des prix de l'énergie à pondération fixe dépend de cette hypothèse<sup>21</sup>. L'indice peut d'ailleurs aussi être calculé au niveau de la branche d'activité. Il est attendu qu'il soit positivement corrélé au coût moyen de l'énergie. Pour tester la solidité de notre instrument, nous vérifions qu'il n'y a pas de sous-identification. Enfin, il est à noter que les effets fixes au niveau de l'entreprise neutralisent également le mix énergétique de départ, utilisé pour le calcul de l'indice des prix de l'énergie, qui est probablement corrélé à la consommation énergétique et à la compétitivité futures<sup>22</sup>.

## *3.2. Effets estimés de la variation des prix de l'énergie au niveau des entreprises*

### *3.2.1. La variation du coût de l'énergie influe davantage sur les émissions de carbone que sur l'emploi*

Le Tableau 1 montre les effets estimés (avec la variable instrumentale) du coût de l'énergie sur la performance énergétique et la performance économique des entreprises<sup>23</sup>. Nous trouvons qu'une hausse du coût de l'énergie est associée à une baisse statistiquement significative de la consommation d'énergie. En particulier, une hausse de 10 % du coût de l'énergie entraîne une baisse de 5,9 % de la consommation d'énergie. La réduction de la consommation de combustibles fossiles, de 6,5 %, est supérieure à celle de la consommation d'électricité, inférieure à 1,5 % et statistiquement non significative. Il est donc cohérent que la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, égale à 9,2 %, soit supérieure à celle de la consommation d'énergie puisque la combustion de carburants fossiles produit plus de CO<sub>2</sub> que le recours à l'électricité<sup>24</sup>. La différence d'amplitude peut être due à l'évolution des prix relatifs des produits énergétiques : les prix réels de l'électricité ont augmenté de 47 % au cours de la période de référence, mais le chiffre atteint 59 % pour le butane-propane, 67 % pour le gaz naturel et 88 % pour le

<sup>21</sup>Le Tableau A.3 de l'Annexe A montre qu'il existe une variation significative des prix des produits énergétiques entre entreprises d'une même branche d'activité. Cette variation est due aux remises quantitatives qui singularisent les prix effectivement payés par chaque entreprise.

<sup>22</sup>Quand la variable dépendante est la variable binaire des innovations mises en œuvre pour économiser l'énergie, il n'est pas possible d'utiliser un estimateur à effets fixes. Dans ce cas, nous incluons une variable binaire de la branche associée à un code à trois chiffres et nous estimons le modèle avec un estimateur probit.

<sup>23</sup>Le test de la force des variables instrumentales utilisées est disponible dans l'annexe.

<sup>24</sup>Le facteur d'émission est égal à 2 750 kg CO<sub>2</sub>/tep pour le gaz naturel, 3 700 kg CO<sub>2</sub>/tep pour le fioul domestique, 3 170 kg CO<sub>2</sub>/tep pour le butane-propane et 582 kg CO<sub>2</sub>/tep pour l'électricité.

fioul domestique<sup>25</sup>. La baisse relativement plus élevée de la consommation de combustibles fossiles peut également venir du fait que l'électricité est moins substituable.

Des éléments montrent également que les variations du coût de l'énergie impactent certaines dimensions de la performance économique des entreprises, mais pas toutes. Le Tableau 1 indique qu'une hausse de 10 % du coût de l'énergie réduit l'emploi de 2,2 %. Cette élasticité est bien plus faible que l'élasticité estimée de la consommation énergie et des émissions de CO<sub>2</sub><sup>26</sup>. De plus, l'effet des prix de l'énergie sur la production réelle et l'investissement n'est pas statistiquement différent de zéro. Pour approfondir notre compréhension des ajustements réalisés par les entreprises, nous consacrons la section suivante à la question de savoir si les variations des prix de l'énergie entraînent une substitution des facteurs, une substitution des produits énergétiques et une modification de l'intensité énergétique.

L'encadré 2 décrit les tests de robustesse effectués en faisant varier les paramètres clés de notre modèle. Les résultats sont robustes quand on applique différents retards aux principales variables explicatives, quand on fait varier le seuil utilisé pour consolider au niveau de l'entreprise les données relatives aux établissements, et quand on modifie les coefficients de pondération appliqués dans la régression pondérée.

### *3.2.2. Une hausse des prix de l'énergie entraîne une substitution des facteurs de production*

Dans la section précédente, nous avons vu qu'une variation du coût de l'énergie a un effet significatif sur la consommation d'énergie, les émissions de CO<sub>2</sub> et l'emploi. Dans cette section, nous cherchons à déterminer si le coût de l'énergie impacte aussi l'intensité énergétique. Si c'est bien le cas, quels moyens les entreprises mettent-elles en œuvre pour réduire leur intensité énergétique : est-ce la substitution des facteurs de production ou des produits énergétiques, ou l'adoption de technologies plus propres ?

Le Tableau 2 montre les effets du coût de l'énergie sur l'intensité énergétique, la consommation d'énergie par employé, la consommation d'énergie par unité d'intrant physique, la consommation d'énergie par unité de capital, et le rapport entre consommation d'électricité et consommation de combustibles fossiles. Une hausse du coût de l'énergie de 10 % a un effet statistiquement significatif de -5,2 % sur l'intensité énergétique<sup>27</sup>. Pour les effectifs, les intrants physiques et le capital, le pourcentage de réduction est significativement plus faible que pour la consommation d'énergie quand le coût de l'énergie augmente. Une hausse du coût de l'énergie de 10 % réduit la consommation d'énergie par employé de 3,7 %, la consommation d'énergie par unité d'intrant physique de 4,2 % et la consommation d'énergie par unité de capital de 5,4 %. En revanche, elle augmente la consommation relative d'électricité de 6,4 %. Ainsi, selon nos résultats, les entreprises réduisent leur intensité énergétique en limitant davantage leur consommation d'énergie que leur consommation d'autres facteurs, et abaissent leur

<sup>25</sup>Voir Tableau A.4.

<sup>26</sup>Les résultats que nous obtenons pour la consommation d'énergie et les émissions de carbone sont analogues à ceux de [Marin et Vona, 2017] qui constatent, en revanche, un impact sur l'emploi beaucoup plus marqué, de 2,6 %.

<sup>27</sup>Pour une hausse du coût de l'énergie de 10 %.

intensité de CO<sub>2</sub> en augmentant la part relative de l'électricité par rapport à celle des combustibles fossiles dans leurs dépenses d'énergie.

#### Encadré 2. Tests de robustesse

##### Effets contemporains de la variation du coût de l'énergie

Dans notre modèle de référence, nous retardons d'un an les variables explicatives de l'équation (1) pour mesurer l'effet de la variation du coût de l'énergie sur la performance économique. Si la consommation d'énergie est très flexible, l'emploi l'est généralement beaucoup moins. Les tableaux C.4 et C.5 présentent les résultats que nous obtenons en estimant l'équation (1) avec des variables explicatives non retardées. Ces résultats sont analogues à ceux de notre estimation de référence. Quand on affecte des valeurs contemporaines aux variables explicatives, la seule différence est la substitution plus forte des combustibles fossiles au profit de l'électricité.

##### Analyse de sensibilité liée à la fusion des données au niveau des entreprises avec les données au niveau des établissements

Pour fusionner l'ensemble des données sur l'énergie collectées au niveau des établissements avec l'ensemble des données financières collectées au niveau des entreprises, nous vérifions que la somme des effectifs de tous les établissements considérés couvre au moins 90 % de l'emploi total de l'entreprise correspondante. Il existe un compromis entre l'exhaustivité des données sur l'énergie – qui exige un seuil élevé – et le nombre d'observations de notre estimation finale – qui exige un seuil qui ne soit pas trop élevé. Nous montrons que le seuil choisi pour les effectifs n'a pas d'impact sur les résultats : les valeurs obtenues avec des seuils de 100 % ou 85 % figurent respectivement dans les tableaux C.6 et C.7. Les résultats de nos estimations sont très similaires malgré le changement de mesure des variables environnementales et la variation de la taille de l'échantillon.

##### Effets dynamiques de la variation du coût de l'énergie

Dans notre modèle de référence (1), nous mesurons les effets à court terme de la variation du coût de l'énergie. Cependant, il est possible que ces variations aient des répercussions plus durables. Nous testons cette hypothèse en augmentant le modèle (1) avec deux retards pour les variables explicatives. Les résultats correspondants figurent dans les tableaux C.8 et C.9. Nous constatons que les entreprises réagissent surtout aux variations du coût de l'énergie des deux années précédentes. Si nous cumulons sur trois ans les effets d'une hausse du coût de l'énergie de 10 %, nous calculons une réduction moyenne de 5,8 % de la consommation d'énergie, de 9,2 % des émissions de CO<sub>2</sub>, et de 2,7 % des effectifs.

##### Coefficients de pondération

Dans l'enquête sur l'énergie, les entreprises qui emploient plus de 50 personnes sont automatiquement incluses dans l'échantillon. Les entreprises plus petites sont sélectionnées par tirage aléatoire en fonction de deux critères : leur taille et leur branche d'activité. De ce fait, elles pourraient être sous-représentées dans l'estimation de référence, ce qui signifierait que les coefficients estimés correspondent uniquement à la population des grandes entreprises. Pour vérifier à quel point c'est le cas, nous estimons le modèle (1) selon la méthode des doubles moindres carrés pondérés. Les coefficients de pondération

utilisés, issus de l'enquête sur l'énergie, sont les inverses de la probabilité que l'entreprise soit sélectionnée. Les résultats obtenus figurent dans les tableaux C.13 et C.14 : ils sont très similaires aux résultats de l'estimation de référence. Nous en concluons que notre estimation ne souffre pas de la méthode d'échantillonnage utilisée dans l'enquête sur l'énergie.

Tableau 1. Effet des prix de l'énergie sur les performances environnementale et économique

	Performance environnementale				Performance économique		
	Consommation d'énergie	Consommation d'électricité	Consommation de combustibles fossiles	Émissions de CO <sub>2</sub>	Effectif	Production réelle	Investissement
In(coût moyen de l'énergie)	-0,592*** (0,111)	-0,144 (0,107)	-0,649*** (0,170)	-0,920*** (0,143)	-0,223*** (0,065)	-0,077 (0,074)	-0,365 (0,258)
Âge de l'entreprise en années	-0,030*** (0,007)	-0,038*** (0,007)	-0,014 (0,009)	-0,023*** (0,007)	-0,032*** (0,004)	-0,033*** (0,004)	0,004 (0,012)
SEQE (0/1)	0,019 (0,037)	-0,038 (0,036)	0,081 (0,061)	0,063 (0,043)	0,061** (0,026)	0,075*** (0,029)	0,032 (0,074)
Effets fixes au niveau de l'entreprise	X	X	X	X	X	X	X
Effets fixes annuels par branche	X	X	X	X	X	X	X
Observations	45 903	45 893	40 788	45 903	45 903	45 903	36 327
Nombre d'entreprises	8 002	7 999	7 048	8 002	8 002	8 002	7 168
Statistique KP LM	388	388	334	388	388	388	304

Note : Erreurs types robustes clusterisées au niveau des entreprises indiquées entre parenthèses. \* p < 0.10, \*\* p < 0.05, \*\*\* p < 0.01. Toutes les variables dépendantes sont exprimées sous forme logarithmique. Toutes les colonnes sont estimées selon la méthode des doubles moindres carrés. Le coût moyen de l'énergie est égal au logarithme du rapport entre les dépenses d'énergie et la consommation d'énergie. La variable instrumentale du coût moyen de l'énergie est l'indice des prix de l'énergie à pondération fixe (IPEPF). Les régressions de la première étape sont indiquées dans le tableau B.1. Les variables explicatives sont retardées d'une période. La consommation d'énergie est la somme des consommations d'électricité, de gaz naturel, de fioul domestique et de butane-propane. Les émissions de CO<sub>2</sub> prises en compte sont celles de la consommation d'énergie.

**Tableau 2. Effet des prix de l'énergie sur l'intensité énergétique et la substitution des facteurs**

	Intensité énergétique (en termes réels)	Consommation d'énergie par employé	Consommation d'énergie par unité d'intrant physique	Consommation d'énergie par unité de capital	Électricité / Combustibles fossiles
ln(coût moyen de l'énergie)	-0,515*** (0,112)	-0,369*** (0,111)	-0,423*** (0,142)	-0,541*** (0,125)	0,638*** (0,171)
Âge de l'entreprise en années	0,003 (0,006)	0,003 (0,007)	0,000 (0,008)	0,001 (0,007)	-0,016* (0,008)
SEQE (0/1)	-0,056 (0,037)	-0,041 (0,034)	-0,088** (0,040)	-0,022 (0,042)	-0,123** (0,053)
Effets fixes au niveau de l'entreprise	X	X	X	X	X
Effets fixes annuels par branche	X	X	X	X	X
Observations	45 903	45 903	45 903	45 903	40 778
Nombre d'entreprises	8 002	8 002	8 002	8 002	7 045
Statistique KP LM	388	388	388	388	333

Note : Erreurs types robustes clusterisées au niveau des entreprises indiquées entre parenthèses. \*  $p < 0,10$  ; \*\*  $p < 0,05$  ; \*\*\*  $p < 0,01$ . Toutes les variables dépendantes sont exprimées sous forme logarithmique. Toutes les colonnes sont estimées selon la méthode des doubles moindres carrés. Le coût moyen de l'énergie est égal au logarithme du rapport entre les dépenses d'énergie et la consommation d'énergie. La variable instrumentale du coût moyen de l'énergie est l'indice des prix de l'énergie à pondération fixe (IPEPF). Les régressions de la première étape sont indiquées dans le tableau B.1. Les variables explicatives sont retardées d'une période. La consommation d'énergie est la somme des consommations d'électricité, de gaz naturel, de fioul domestique et de butane-propane. Les émissions de CO<sub>2</sub> prises en compte sont celles de la consommation d'énergie.

### 3.2.3. Les entreprises réagissent différemment selon leur taille

Les coefficients estimés dans la section précédente sont-ils les mêmes pour toutes les entreprises françaises ou dépendent-ils de la taille de l'entreprise ? Le Tableau 3 présente les termes d'interaction avec une variable binaire égale à 1 quand l'entreprise emploie moins de 50 personnes et une variable binaire égale à 1 quand l'entreprise emploie plus de 250 personnes<sup>28</sup>. Nous constatons que les petites, les moyennes et les grandes entreprises réagissent différemment en termes de performance tant environnementale qu'économique.

Plus l'entreprise est grande, plus elle améliore sa performance environnementale quand le coût de l'énergie augmente. Ainsi, une hausse du coût de l'énergie de 10 % entraîne une diminution de la consommation d'énergie de 6 % dans les moyennes entreprises et de 8,5 % dans les grandes entreprises, mais son effet sur les petites entreprises est statistiquement non significatif. S'agissant de la consommation de combustibles fossiles, elle baisse de 6 % dans les petites et moyennes entreprises, et de 8,6 % dans les grandes entreprises. Cette

<sup>28</sup>Pour éviter les problèmes d'endogénéité, nous calculons ces variables binaires sur la base du nombre de personnes qu'employaient les entreprises avant la période étudiée. Les coefficients sont obtenus par estimation du modèle (2).

différence existe aussi pour les émissions de carbone, réduites de 7 % par les petites entreprises, de 9 % par les moyennes entreprises et de 11 % par les grandes entreprises<sup>29</sup>. Est-ce à dire que, si les grandes entreprises atténuent davantage leur impact environnemental, c'est parce qu'elles réduisent leur production dans des proportions plus importantes ?

D'après nos résultats, ce serait seulement une partie de l'explication. Les grandes entreprises freinent leur production de 2,6 %, mais les moyennes entreprises ne la modifient pas et, étonnamment, les petites entreprises l'accroissent de 1,4 %, ce qui suggère qu'elles récupèrent pour partie les parts de marché abandonnées par les grandes entreprises. Les réactions sont également très différentes pour ce qui est de l'emploi. Ainsi, une hausse du coût de l'énergie de 10 % n'a pas d'impact sur l'emploi des petites entreprises, mais elle réduit de 2,6 % celui des moyennes entreprises, et jusqu'à 5,5 % celui des grandes entreprises. Enfin, seules les grandes entreprises baissent leur niveau d'investissement quand le coût de l'énergie augmente.

Faut-il en conclure que les petites entreprises sont moins touchées que les grandes par une hausse du coût de l'énergie ? Pas nécessairement, car les résultats de nos estimations ne concernent que les entreprises qui restent sur le marché. Il est possible que certaines petites entreprises doivent quitter le marché sous l'effet de la hausse du coût de l'énergie, tandis que les grandes entreprises, elles, demeurent quoi qu'il en soit dans l'échantillon.

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer pourquoi les grandes entreprises réduisent leurs effectifs, au contraire des petites qui survivent. Premièrement, les grandes entreprises sont plus efficientes que les petites, non seulement du fait des économies d'échelle, mais aussi parce qu'elles peuvent payer les coûts fixes des équipements ou des stratégies d'amélioration de leur efficacité énergétique. Les plus petites entreprises, elles, ont davantage de latitude que les grandes pour gagner en efficacité énergétique. Les deux catégories d'entreprises réduisent leur consommation d'énergie, mais les grandes ne peuvent le faire sans réduire leur production et, par extension, leur effectif. Cette interprétation repose sur l'hypothèse que les petites entreprises ne minimisent pas leurs coûts de production, une idée qui rejoint l'argument de [Porter et Van der Linde 1995], selon lequel une hausse suffisante du prix de l'énergie déclenche la réorganisation de la production des entreprises et, partant, met au jour des possibilités d'économies.

Deuxièmement, les grandes entreprises sont les seules à pouvoir engager les coûts fixes d'une délocalisation d'une partie de leur production à l'étranger, ce qui pourrait les conduire à réduire leurs effectifs locaux en conséquence. Cette interprétation est cohérente avec le résultat selon lequel la production réelle des grandes entreprises est réduite en moindre proportion que leur effectif en réponse à une variation du coût de l'énergie. Les PME n'ont généralement pas la possibilité de délocaliser leur production. Soit elles quittent le marché quand elles sont énergivores, soit elles captent les parts de marché des entreprises sortantes quand elles sont économies en énergie.

Troisièmement, les petites entreprises qui survivent s'approprient les parts de marché des autres petites entreprises sorties du marché à cause de la hausse du coût de l'énergie. Ce phénomène peut expliquer pourquoi l'effet observé est positif sur la production des petites entreprises.

---

<sup>29</sup>Les coefficients relatifs aux petites entreprises et au grande entreprises sont obtenus par addition du coefficient d'élasticité et des coefficients d'interaction.

Ces différences de conséquences sur la performance économique entre petites, moyennes et grandes entreprises sont-elles dues à des comportements de substitution différents ? Le Tableau 4 montre les résultats obtenus pour la substitution des facteurs de production avec le modèle augmenté (2). Nous constatons que toutes les catégories d'entreprises remplacent une partie de leur consommation d'énergie par une quantité de main d'œuvre, d'intrants physiques ou de capital en proportions similaires. Cette tendance est plus forte dans les grandes entreprises que dans les PME. De leur côté, les entreprises plus petites remplacent les combustibles fossiles par de l'électricité dans une proportion supérieure à celle des moyennes et grandes entreprises. Cette substitution plus élevée est cohérente avec l'interprétation qui veut que les petites entreprises aient plus de latitude pour réaliser des gains d'efficacité énergétique.

Enfin, ces effets hétérogènes dépendant de la taille de l'entreprise sont-ils dus à des différences d'intensité énergétique ? Nous concluons que ce n'est pas le cas quand nous estimons, comme indiqué dans les tableaux C.11 et C.12, un modèle à deux termes d'interaction. Le premier représente l'interaction entre le coût de l'énergie et une variable binaire identifiant les PME ; le second représente l'interaction entre le coût de l'énergie et l'intensité énergétique des entreprises avant la période étudiée. Nous constatons, comme indiqué dans le Tableau 3, que les petites entreprises réduisent moins leur consommation d'énergie, leurs émissions de carbone, leurs investissements et leurs effectifs que les grandes entreprises. De plus, les entreprises qui étaient plus énergivores au début de la période étudiée réagissent en proportion plus importante que les entreprises économies en énergie. Ce résultat est conforme à nos attentes. Les entreprises énergivores ont plus de latitude pour gagner en efficacité énergétique, mais sont plus exposées que les entreprises économies en énergie en termes de compétitivité.

Ces résultats donnent à penser que la substitution des facteurs joue un rôle important dans la réduction de l'intensité énergétique. L'encadré 3 propose, pour approfondir la question, un examen des effets de la variation des prix de l'énergie sur les technologies des entreprises.

**Tableau 3. Effets hétérogènes sur la performance environnementale et sur la performance économique**

	Consommation d'énergie	Consommation d'électricité	Consommation de combustibles fossiles	Émissions de CO <sub>2</sub>	Effectif	Production réelle	Investissement
In(coût moyen)	-0,606*** (0,115)	-0,163 (0,109)	-0,605*** (0,177)	-0,932*** (0,148)	-0,255*** (0,067)	-0,110 (0,076)	-0,362 (0,263)
In(coût moyen) x Petite (0/1)	0,258*** (0,059)	0,321*** (0,060)	0,032 (0,090)	0,222*** (0,075)	0,368*** (0,042)	0,252*** (0,045)	0,285** (0,126)
In(coût moyen) x Grande (0/1)	-0,240*** (0,049)	-0,288*** (0,051)	-0,258*** (0,067)	-0,203*** (0,055)	-0,290*** (0,038)	-0,152*** (0,044)	-0,348*** (0,095)
Âge de l'entreprise en années	-0,029*** (0,006)	-0,037*** (0,007)	-0,014 (0,009)	-0,023*** (0,007)	-0,032*** (0,004)	-0,032*** (0,004)	0,005 (0,012)
SEQE (0/1)	0,061* (0,037)	0,012 (0,036)	0,111* (0,060)	0,099** (0,043)	0,114*** (0,026)	0,107*** (0,029)	0,089 (0,075)
Effets fixes au niveau de l'entreprise	X	X	X	X	X	X	X
Effets fixes annuels par branche	X	X	X	X	X	X	X
Observations	45 903	45 893	40 788	45 903	45 903	45 903	36 327
Nombre d'entreprises	8 002	7 999	7 048	8 002	8 002	8 002	7 168
Statistique KP LM	382	382	333	382	382	382	298

Note : Erreurs types robustes clusterisées au niveau des entreprises indiquées entre parenthèses. \* p < 0.10, \*\* p < 0.05, \*\*\* p < 0.01. Toutes les variables dépendantes sont exprimées sous forme logarithmique. Toutes les colonnes sont estimées selon la méthode des doubles moindres carrés. Le coût moyen de l'énergie est égal au logarithme du rapport entre les dépenses d'énergie et la consommation d'énergie. La variable binaire « Petite » est égale à 1 quand l'entreprise employait moins de 50 personnes avant la période étudiée. La variable binaire « Grande » est égale à 1 quand l'entreprise employait plus de 250 personnes avant la période étudiée. Les variables instrumentales du coût moyen de l'énergie et des termes d'interaction sont l'indice des prix de l'énergie à pondération fixe (IPEPF), l'IPEPF combiné avec la variable binaire « Petite », et l'IPEPF combiné avec la variable binaire « Grande ». Les régressions de la première étape sont indiquées dans le tableau B.1. Les variables explicatives sont retardées d'une période. La consommation d'énergie est la somme des consommations d'électricité, de gaz naturel, de fioul domestique et de butane-propane. Les émissions de CO<sub>2</sub> prises en compte sont celles de la consommation d'énergie.

**Tableau 4. Effets hétérogènes sur l'intensité énergétique et la substitution des facteurs**

	Intensité énergétique (en termes réels)	Consommation d'énergie par employé	Consommation d'énergie par unité d'intrant physique	Consommation d'énergie par unité de capital	Électricité / Combustibles fossiles
In(coût moyen de l'énergie)	-0,496*** (0,116)	-0,351*** (0,115)	-0,370** (0,148)	-0,541*** (0,129)	0,561*** (0,176)
In(coût moyen) x Petite (0/1)	0,006 (0,057)	-0,110* (0,060)	-0,115 (0,078)	0,024 (0,068)	0,277*** (0,088)
In(coût moyen) x Grande (0/1)	-0,088* (0,049)	0,050 (0,044)	-0,094 (0,066)	-0,029 (0,057)	-0,034 (0,062)
Âge de l'entreprise en années	0,003 (0,006)	0,002 (0,007)	0,000 (0,008)	0,001 (0,007)	-0,015* (0,009)
SEQE (0/1)	-0,046 (0,037)	-0,053 (0,034)	-0,085** (0,041)	-0,017 (0,042)	-0,103* (0,053)
Effets fixes au niveau de l'entreprise	X	X	X	X	X
Effets fixes annuels par branche	X	X	X	X	X
Observations	45 903	45 903	45 903	45 903	40 778
Nombre d'entreprises	8 002	8 002	8 002	8 002	7 045
Statistique KP LM	382	382	382	382	332

Note : Erreurs types robustes clusterisées au niveau des entreprises indiquées entre parenthèses. \* p < 0,10 ; \*\* p < 0,05 ; \*\*\* p < 0,01. Toutes les variables dépendantes sont exprimées sous forme logarithmique. Toutes les colonnes sont estimées selon la méthode des doubles moindres carrés. Le coût moyen de l'énergie est égal au logarithme du rapport entre les dépenses d'énergie et la consommation d'énergie. La variable binaire « Petite » est égale à 1 quand l'entreprise employait moins de 50 personnes avant la période étudiée. La variable binaire « Grande » est égale à 1 quand l'entreprise employait plus de 250 personnes avant la période étudiée. Les variables instrumentales du coût moyen de l'énergie et des termes d'interaction sont l'indice des prix de l'énergie à pondération fixe (IPEPF), l'IPEPF combiné avec la variable binaire « Petite », et l'IPEPF combiné avec la variable binaire « Grande ». Les régressions de la première étape sont indiquées dans le tableau B.1. Les variables explicatives sont retardées d'une période. La consommation d'énergie est la somme des consommations d'électricité, de gaz naturel, de fioul domestique et de butane-propane. Les émissions de CO<sub>2</sub> prises en compte sont celles de la consommation d'énergie.

**Encadré 3. Effets des variations des prix de l'énergie sur le développement et l'adoption des technologies**

Les grandes entreprises innovent davantage quand le coût de l'énergie augmente

Nous avons montré jusqu'à présent que, s'agissant des grandes entreprises, une hausse du coût de l'énergie a un effet négatif sur l'emploi, la production réelle et l'investissement. Dans cette sous-section, nous nous intéressons à l'effet des prix de l'énergie sur une dimension supplémentaire de la compétitivité : l'activité d'innovation, telle que mesurée par le stock des brevets déposés par l'entreprise<sup>30</sup>. En théorie, une hausse du coût de l'énergie peut se répercuter de deux manières sur l'innovation. Premièrement, il pourrait y avoir un effet d'échelle négatif quand la part de marché de l'entreprise se contracte parce qu'une hausse du coût de l'énergie augmente les coûts de production. Si la part de marché diminue, les gains issus de l'innovation diminuent eux aussi, ce qui fait que l'entreprise est moins incitée à investir dans la R-D. Deuxièmement, il pourrait y avoir un effet de différentiation positif par lequel les entreprises sont plus incitées à développer de nouveaux produits pour maintenir leur part de marché.

Le Tableau 5 récapitule nos résultats<sup>31</sup>. Quand le coût de l'énergie augmente de 10 %, le stock de brevets croît de 6,3 % dans les grandes entreprises mais décroît de 3,5 % dans les PME. C'est pourquoi il est possible que l'effet de différentiation soit plus fort que l'effet d'échelle dans les grandes entreprises. Les PME innovent moins car elles ont probablement moins les capacités de le faire<sup>32</sup>.

**Tableau 5. Innovation et indice des prix de l'énergie**

	Stock de brevets
IPEPF	0,627*** (0,202)
IPEPF x PME (0/1)	-0,978*** (0,148)
Âge de l'entreprise en années	-0,022* (0,012)
SEQE (0/1)	-0,004 (0,134)
Effets fixes au niveau de l'entreprise	X
Effets fixes annuels par branche	X
Observations	29 513
Nombre d'entreprises	3 403
Effet marginal des PME	-0,352** (0,159)

*Note* : Erreurs types robustes clusterisées au niveau des entreprises indiquées entre parenthèses. \* p < 0,10 ; \*\* p < 0,05 ; \*\*\* p < 0,01. Le stock de brevets est exprimé sous forme logarithmique. Le modèle est estimé selon la méthode des MCO. L'IPEPF est l'indice des prix de l'énergie à pondération fixe.

### La hausse des prix de l'énergie stimule les investissements de protection de l'environnement

Le Tableau 5 montre que des variations des prix de l'énergie modifient les technologies des grandes entreprises. Cependant, les brevets ne rendent pas compte de tous les types de changements technologiques susceptibles d'y intervenir. Premièrement, ils ne reflètent pas toutes les formes d'innovation puisque les entreprises ne brevettent qu'une partie de leurs savoirs dans le cadre de leur stratégie d'appropriation. Deuxièmement, ils témoignent non pas de l'adoption des technologies, mais du développement de nouvelles technologies. Pour combler les lacunes des données sur les brevets, nous examinons aussi l'investissement des entreprises dans les technologies de protection de l'environnement. Cet aspect nous intéresse car ces technologies sont souvent énergivores. L'efficacité d'un équipement de protection de l'environnement est souvent positivement corrélée à sa consommation d'énergie<sup>33</sup>.

Le Tableau 6 récapitule l'estimation du modèle (1) quand la variable expliquée est l'investissement de protection de l'environnement et la variable explicative principale est le prix de l'énergie exogène (IPEPF)<sup>34</sup>. Nous montrons qu'une hausse du coût de l'énergie est positivement corrélée à l'investissement dans des technologies de réduction de la pollution de l'air, de la pollution de l'eau et des déchets au niveau des établissements<sup>35</sup>. Si ce coût de l'énergie augmente de 10 % alors les investissements dans les solutions de

<sup>30</sup>La littérature utilise le stock de brevets comme mesure du stock de connaissances [Keller W., 2004]. Pour tenir compte de la dépréciation des savoirs au cours du temps, nous appliquons à ce stock de brevets le taux d'amortissement de 15 % usuel utilisé dans la plupart des études [Keller W., 2004]. Nous comptons les familles de brevets, et non les dépôts de brevets, afin de ne comptabiliser chaque invention qu'une seule fois.

<sup>31</sup>Nous estimons une équation de forme réduite pour obtenir le plus grand nombre d'observations possible. À des fins de clarté, nous privilégions un modèle avec un seul terme d'interaction.

<sup>32</sup>[Czarnitzki et Hottenrott, 2011] concluent que les entreprises petites ou jeunes peuvent se trouver confrontées à des contraintes financières pour ce qui est de leurs projets de R-D. [Hottenrott, H., et Peters, B., 2012] montrent que la taille de l'entreprise est positivement corrélée à l'innovation.

<sup>33</sup>Par exemple, [Mussatti et Hemmer, 2002] expliquent que les laveurs Venturi à haute performance sont plus efficaces pour filtrer les particules fines et submicroniques, mais au prix d'un coût en capital et d'une consommation d'électricité bien plus élevés qu'avec un laveur Venturi traditionnel. Un autre exemple est l'incinération des composés organiques volatils (COV), qui nécessite souvent d'ajouter un combustible auxiliaire comme le gaz naturel pour porter la température des effluents gazeux au niveau approprié [Vatatuuk et al., 2000]. De la même façon, la réduction sélective non catalytique des oxydes d'azote est plus efficace à haute température [Mussatti et al., 2000]. [Englehardt, 1993] met en avant le coût énergétique des différentes technologies antipollution.

<sup>34</sup>Nous préférons estimer ici une équation de forme réduite car le nombre d'observations est limité. Utiliser le coût de l'énergie réduirait le nombre d'observations disponibles car il faudrait alors disposer de données sur la consommation de produits énergétiques pour chaque année. Au contraire, l'IPEPF ne nécessite que les coefficients de pondération de la consommation de produits énergétiques telle qu'établie avant la période étudiée.

<sup>35</sup>Comme expliqué dans la section 2, les données sur l'investissement antipollution sont disponibles au niveau des établissements. Il n'est pas possible de les agréger au niveau des entreprises car l'information est manquante pour un trop grand nombre d'établissements.

réduction de la pollution augmentent de 7 % pour ce qui est de l'air et des déchets, et de 5 % pour ce qui est de l'eau.

Nos résultats suggèrent qu'une hausse du coût de l'énergie conduit les entreprises non seulement à réduire leur consommation d'énergie et donc leurs émissions de carbone, mais aussi à investir davantage dans des solutions de réduction d'autres formes de pollution. Pourquoi, quand on doit réduire sa consommation d'énergie, investir dans des dispositifs de traitement de l'eau ? Parce que la production d'eau pure à partir d'eau usée exige aussi de l'énergie [Barakat, 2011, Gude, 2012]. De ce fait, pour continuer à dépolluer un volume d'eau donné, l'entreprise doit compenser la baisse de sa consommation d'énergie par un investissement dans un dispositif d'assainissement plus économique en énergie.

Ces résultats mettent en lumière l'arbitrage que les entreprises ont à faire entre le recours à des systèmes de protection de l'environnement peu coûteux mais énergivores, et le recours à des systèmes de protection de l'environnement plus chers mais aussi plus économiques en énergie. Si le prix de l'énergie augmente, les entreprises sont davantage incitées à investir dans les seconds pour continuer de traiter les mêmes quantités de polluants.

**Tableau 6: Prix de l'énergie et investissements de protection de l'environnement**

	Investissements en bout de chaîne				
	Toutes pollutions	Eau	Air	Déchets	Sol
IPEPF	0,515** (0,246)	0,537** (0,274)	0,648** (0,314)	0,717** (0,301)	0,008 (0,314)
Âge de l'établissement en années	-0,010* (0,006)	-0,007 (0,007)	-0,012 (0,008)	0,013 (0,011)	-0,026*** (0,006)
SEQE (0/1)	0,142 (0,101)	0,028 (0,121)	0,238* (0,122)	0,057 (0,128)	0,126 (0,148)
Effets fixes au niveau de l'établissement	X	X	X	X	X
Effets fixes annuels	X	X	X	X	X
Observations	14 820	14 820	11 334	13 280	12 103
Nombre d'établissements	3 879	3 879	3 059	3 852	3 342

Note : Erreurs types robustes clusterisées au niveau des établissements indiqués entre parenthèses. \*  $p < 0,10$  ; \*\*  $p < 0,05$  ; \*\*\*  $p < 0,01$ . Le stock de brevets est exprimé sous forme logarithmique. Le modèle est estimé selon la méthode des MCO. L'IPEPF est l'indice des prix de l'énergie à pondération fixe. Toutes les variables dépendantes sont exprimées sous forme logarithmique. Les investissements destinés à prévenir la pollution de l'air, la pollution de l'eau et la pollution par les déchets sont des investissements en bout de chaîne. Le tableau A.1. fournit les statistiques de synthèse relatives à l'échantillon de l'estimation.

### 3.2.4. Étude de l'hétérogénéité au niveau des branches d'activité

Nous avons supposé jusqu'à présent que les paramètres du modèle (9) sont les mêmes pour toutes les branches d'activité. Il y a pourtant des raisons de penser qu'ils peuvent varier, puisque les branches d'activité elles-mêmes diffèrent à de nombreux égards, comme la

demande du marché, l'élasticité de substitution de l'énergie et des autres facteurs de production, ou le nombre d'entreprises en activité. C'est pourquoi, nous estimons le modèle (9) séparément pour chaque activité associée à un code NACE à deux chiffres. Pour ce faire, nous utilisons la méthode des MCO, et non des DMC, car la variable instrumentale exploite la variation inter-branches du prix des produits énergétiques. Nous partons donc du principe que les coefficients au niveau des branches d'activité sont probablement une estimation basse de l'effet réel<sup>36</sup>.

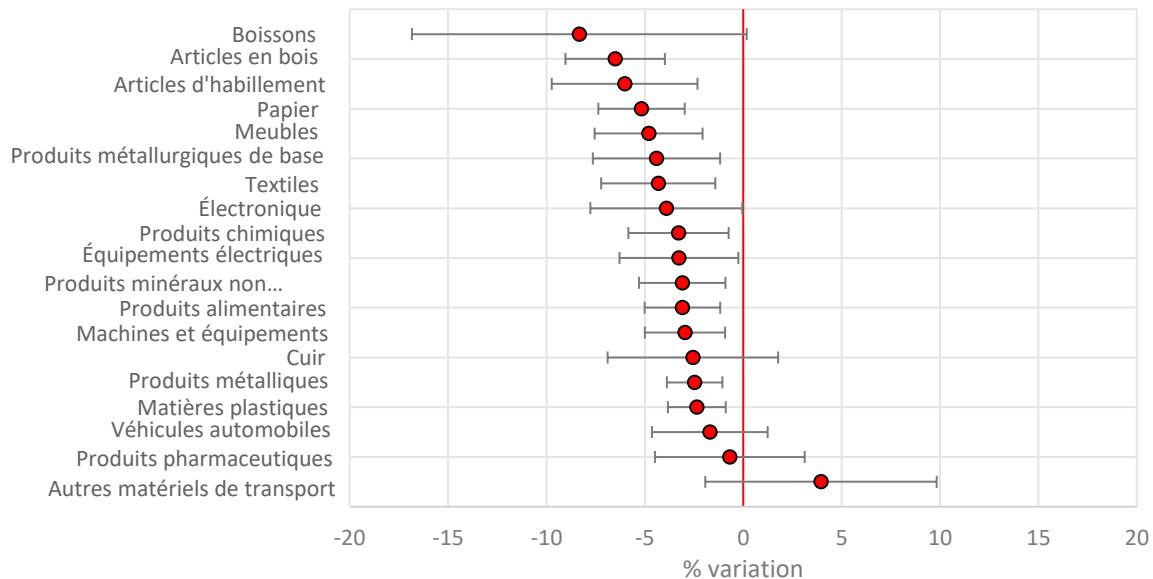
Le Graphique 7 illustre l'impact d'une hausse du coût de l'énergie de 10 % sur les émissions de CO<sub>2</sub> et le Graphique 8 illustre son impact sur l'emploi<sup>37</sup>. Nous constatons des différences importantes entre branches d'activité. Plus précisément, 79 % d'entre elles réduisent leurs émissions de CO<sub>2</sub> de façon statistiquement significative, 26 % réduisent leurs effectifs, 53 % réduisent leurs émissions de CO<sub>2</sub> mais par leurs effectifs, et 0 % réduisent leurs effectifs mais par leurs émissions de CO<sub>2</sub> en réponse à la hausse des prix de l'énergie. Quand le coût de l'énergie augmente de 10 %, les émissions de CO<sub>2</sub> baissent le plus dans les secteurs des boissons (8,3 %), des articles en bois (6,5 %) et des articles d'habillement (6 %). Les effectifs diminuent principalement dans les branches d'activité des produits métallurgiques de base (1,2 %), des matières plastiques (0,78 %) et des produits alimentaires (0,75 %). Ces valeurs sont en accord avec les principaux résultats que nous obtenons quand nous utilisons la méthode des MCO, comme indiqué dans le tableau C.1. Le tableau A.5. rend compte du détail des coefficients et de l'intensité énergétique moyenne dans chaque branche d'activité. L'effet sur les effectifs est plus négatif dans les entreprises des branches d'activité énergivores où les dépenses d'énergie représentent une part plus élevée de la production<sup>38</sup>.

<sup>36</sup>Nous nous attendons à un estimateur MCO biaisé à la hausse puisque les facteurs non observés que sont l'efficacité de l'entreprise ou sa capacité de gestion sont corrélés négativement à l'emploi et à  $Cout_{it}$ . Une entreprise efficiente produit autant avec moins d'effectif, et réussit à négocier des prix de l'énergie plus avantageux.

<sup>37</sup>Les résultats détaillés figurent dans le tableau A.5.

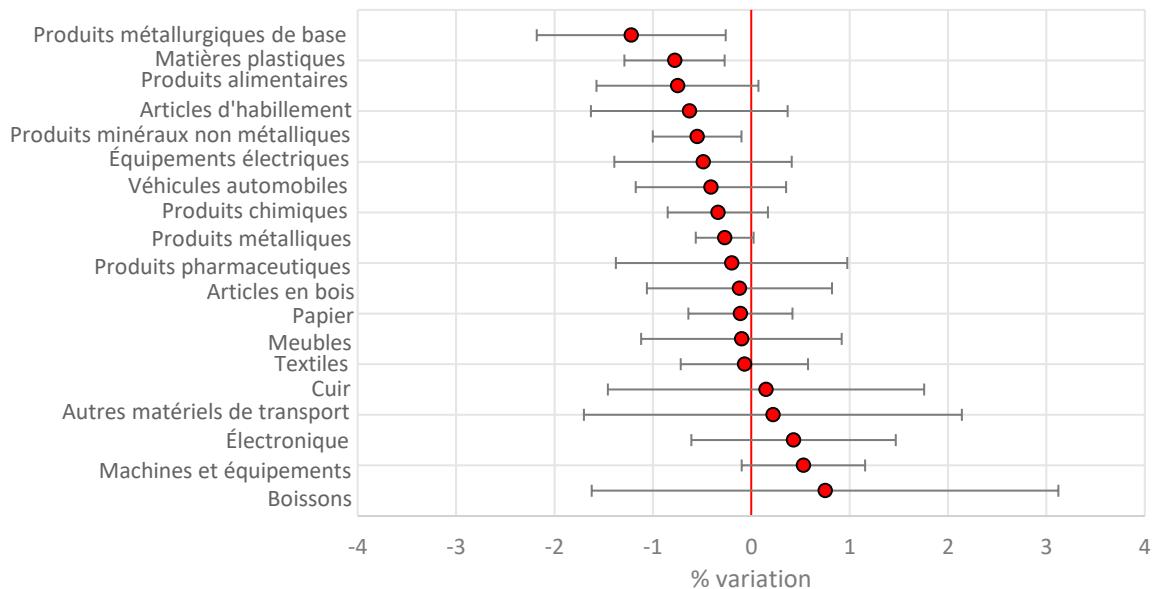
<sup>38</sup>Le coefficient estimé pour l'effectif est corrélé à l'intensité énergétique à -0,45 et à la part des dépenses d'énergie dans la production totale à -0,51.

**Graphique 7. Variation des émissions de CO<sub>2</sub> dans chaque branche d'activité, pour une hausse du coût de l'énergie de 10 %**



Note : Ces intervalles de confiance sont estimés au moyen d'une régression MCO distincte.

**Graphique 8: Redéploiement des salariés dans chaque branche d'activité, pour une hausse du coût de l'énergie de 10 %**



Note : Ces intervalles de confiance sont estimés au moyen d'une régression MCO distincte.

## 4. Effet net de la variation des prix de l'énergie sur l'emploi au niveau des branches d'activité

Dans cette section, nous estimons l'effet de la variation des prix de l'énergie sur l'emploi au niveau des branches d'activité. Cette analyse vient compléter l'analyse microéconomique de la section précédente en tenant compte des ajustements interentreprises induits par la variation des prix de l'énergie. Il nous est possible de déterminer l'effet net des prix de l'énergie sur l'emploi total puisque le nombre total de salariés de chaque branche est observé grâce aux données financières d'entreprises. L'exercice est en revanche impossible dans le cas des émissions de carbone dans la mesure où elles ne sont pas observées pour la population des entreprises mais seulement pour les firmes incluses dans l'enquête EACEI.

### 4.1. La variation des prix de l'énergie est sans effet sur la création nette totale d'emplois

Nous analysons l'effet des prix de l'énergie sur les effectifs des branches d'activité à l'aide de la méthode de mesure des flux d'emploi popularisée par [Davis et Haltiwanger, 1992]. Ainsi, comme [Davis et Haltiwanger, 1992], nous calculons le taux de création d'emplois dans la branche d'activité  $k$  à l'année  $t$ ,  $POS_{kt}$ , égal à la somme des augmentations d'effectifs observées dans les entreprises en croissance et nouvellement arrivées sur le marché entre  $t - 1$  et  $t$ , divisée par la taille de la branche d'activité. Il est ainsi possible d'exprimer le flux d'emplois créés par un taux<sup>39</sup> :

$$POS_{kt} = \frac{\sum_{i \in k^+} |EMP_{ikt} - |}{\sum_{i \in k} (EMP_{ikt} + EMP_{ikt-1})/2} \quad (4)$$

Où  $k^+$  correspond au sous-ensemble des entreprises de la branche  $k$  qui voient leurs effectifs croître entre  $t - 1$  et  $t$ .

De la même manière, la destruction d'emplois est donnée par la somme des emplois perdus dans les entreprises qui sont en perte de vitesse ou qui ont quitté le marché et s'exprime sous la forme d'un taux calculé comme suit :

$$NEG_{kt} = \frac{\sum_{i \in k^-} |EMP_{ikt} - EMP_{ikt-1}|}{\sum_{i \in k} (EMP_{ikt} + EMP_{ikt-1})/2} \quad (5)$$

Où  $k^-$  correspond au sous-ensemble des entreprises de la branche  $k$  qui voient leurs effectifs décroître entre  $t - 1$  et  $t$ .

Les taux de création et de destruction d'emplois servent à calculer la variation nette des effectifs  $NET_{kt}$  de la branche  $k$  entre l'année  $t - 1$  et  $t$  :

$$NET_{kt} = POS_{kt} - NEG_{kt} \quad (6)$$

Après avoir calculé ces indicateurs des flux d'emploi, nous estimons l'équation suivante :

$$y_{kt} = \alpha_0 + \beta FFEPI_{kt-1} + \lambda_t + \gamma_k + \varepsilon_{kt} \quad (7)$$

<sup>39</sup> La taille de la branche d'activité correspond à la moyenne des effectifs enregistrés entre  $t$  et  $t - 1$ .

Où  $y_{kt} \in \{POS_{kt}, NEG_{kt}, NET_{kt}\}$  correspond aux flux d'emploi observés dans la branche  $k$  à l'année  $t$ , et  $FEPI_{kt-1}$  à l'indice des prix de l'énergie à pondération fixe retardé tel que précédemment défini.  $\lambda_t$  et  $\gamma_k$  expriment respectivement les effets fixes pour la période et la branche considérées. L'estimation (7) décrit l'effet direct que les mouvements des prix de l'énergie ont sur les variables d'intérêt.

Le Tableau 7 présente les résultats de l'exercice d'estimation. Les mouvements des prix de l'énergie n'ont pas d'effet statistiquement significatif sur la création ou la destruction totale d'emplois et, surtout, sur l'emploi net.

**Tableau 7. Effet des prix de l'énergie sur la création et destruction d'emplois au niveau des branches d'activité**

	Taux de création brute d'emplois	Taux de destruction brute d'emplois	Variation nette des effectifs
<i>IPEPF</i>	0,126 (0,167)	0,012 (0,029)	0,114 (0,173)
Effets fixes au niveau de la branche	X	X	X
Effets fixes temporels	X	X	X
Observations	666	666	666
Nombre de branches	61	61	61
R <sup>2</sup> ajusté	0,10	0,38	0,20

*Note* : Chaque colonne correspond à une régression distincte. Les erreurs types robustes clusterisées au niveau code NACE à trois chiffres sont indiquées entre parenthèses. \*  $p < 0,10$  ; \*\*  $p < 0,05$  ; \*\*\*  $p < 0,01$ . *IPEPF* désigne l'indice des prix moyens de l'énergie à pondération fixe.

Il ressort de l'analyse microéconomique présentée à la section 3. que l'élévation des prix de l'énergie a un effet négatif sur le nombre de salariés des grandes entreprises, ce qui semble de prime abord contredire notre conclusion selon laquelle la variation des prix de l'énergie est sans effet sur l'emploi net des branches. Ces résultats peuvent coexister dans la mesure où l'analyse microéconomique porte essentiellement sur les entreprises qui restent sur le marché alors que l'analyse sectorielle les couvre toutes, qu'elles poursuivent ou non leurs activités. Premièrement, il n'est pas possible, dans l'analyse microéconomique, de mesurer l'effet de la variation des prix de l'énergie sur les entreprises qui entrent sur le marché puisque ces structures ne font pas partie du périmètre d'observation avant leur entrée sur le marché. Deuxièmement, l'analyse microéconomique montre qu'en moyenne, le prix de l'énergie a deux effets sur l'emploi : un effet négatif dans le cas des grandes et moyennes entreprises, et un effet négligeable dans celui des petites entreprises. L'hétérogénéité peut néanmoins caractériser chaque groupe d'entreprises, petites, moyennes ou grandes. Il est possible que, parmi les entreprises économies en énergie restées en activité, certaines créent des emplois en récupérant des parts de marché provenant de leurs rivales énergivores. En d'autres termes, le redéploiement de la production entre entreprises dû aux variations du prix de l'énergie entraîne un redéploiement des emplois entre ces mêmes entités.

#### *4.2. Le redéploiement de la production compense l'effet négatif des prix de l'énergie sur l'emploi*

Pour vérifier si le redéploiement de la production des entreprises énergivores vers leurs rivales économies en énergie compense l'effet négatif sur les effectifs de la majorité des entreprises survivantes qui est observé dans l'analyse microéconomique, nous procédons en deux temps.

Tout d'abord, nous décomposons l'intensité énergétique de la branche considérée en deux éléments : (i) une composante microéconomique correspondant à la variation de l'intensité énergétique de l'entreprise moyenne et (ii) une composante « redéploiement de la production » correspondant à la variation de la production entre les entreprises de différents niveaux d'intensité énergétique. La méthode employée est détaillée dans l'encadré 4. Dans la grande majorité des branches, nous observons un redéploiement de la production des entreprises énergivores vers les entreprises plus économies en énergie.

Puis nous estimons séparément, pour chaque branche associée à un code à trois chiffres, l'évolution suivie par les indices de création et de destruction d'emplois en fonction de l'intensité énergétique et de ses deux composantes – intensité énergétique non pondérée et redéploiement de la production – en tenant compte des effets fixes propres à la branche et des effets fixes propres à chaque année. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 9. Nous constatons que le redéploiement de la production vers les entreprises économies en énergie n'a pas d'effet statistiquement significatif sur la création nette d'emplois. En d'autres termes, il s'opère un transfert de la production et de l'emploi des entreprises énergivores vers celles économies en énergie sans que cela rejaillisse sur le niveau total des effectifs. Ce résultat est cohérent avec notre conclusion selon laquelle le prix de l'énergie est sans incidence sur la création nette d'emplois.

**Encadré 4. Redéploiement de l'emploi entre entreprises économes en énergie et entreprises énergivores**

Pour mesurer le redéploiement de l'emploi entre entreprises économes en énergie et énergivores, nous procédons comme [Brucal et al., 2018] en calculant l'intensité énergétique agrégée  $W_{kt}$ , qui désigne la moyenne des intensités énergétiques des entreprises pondérée par leur part dans la production manufacturière totale  $s_{it}$ . Nous calculons  $W_{kt}$  pour toutes les entreprises du secteur  $k$  retenues dans l'échantillon pour chaque année  $t$ . Puis nous décomposons l'intensité énergétique agrégée en deux éléments : l'intensité énergétique non pondérée et la covariance entre la part des entreprises dans la production du secteur et son intensité énergétique :

$$\underbrace{W_{kt} = \sum_i s_{ikt} \ln EI_{ikt}}_{\text{Intensité énergétique agrégée}} = \underbrace{\overline{\ln EI}_{kt}}_{\substack{\text{Intensité énergétique} \\ \text{moyenne non pondérée}}} + \underbrace{\sum_i (s_{ikt} - \bar{s}_{kt})(\ln EI_{ikt} - \overline{\ln EI}_{kt})}_{\text{Redéploiement}} \quad (8)$$

Où  $s_{ikt}$  désigne la part de la production de l'entreprise  $i$  dans la production du secteur  $k$  pour l'année  $t$ ,  $\bar{s}_{kt}$  la moyenne des parts de la production de chaque entreprise dans la production du secteur  $k$ ,  $\ln EI_{ikt}$  le logarithme du rapport entre les dépenses d'énergie et la production réelle de l'entreprise  $i$ ,  $\overline{\ln EI}_{kt}$  la moyenne des logarithmes des rapports entre dépenses d'énergie et production réelle calculés pour tous les établissements du secteur manufacturier.

La variation du premier terme (intensité énergétique moyenne non pondérée) correspond à celle de l'intensité énergétique des entreprises. La variation du second terme (redéploiement), dès lors qu'elle est positive, signifie que les plus grands consommateurs d'énergie produisent davantage. Par conséquent, la variation du second terme rend compte des effets de la redistribution des parts de marché entre entreprises de différents niveaux d'intensité énergétique.

En raison des contraintes liées aux données, nous ne pouvons pas mesurer  $W_{kt}$  et ses deux composantes pour l'ensemble de la population des entreprises manufacturières. À la place, nous calculons ces trois éléments à partir de notre échantillon d'estimations employé dans l'analyse microéconomique. Comme cet échantillon ne contient que des entreprises étudiées dans l'EACEI, sa composition évolue dans le temps. En revanche, il contient toujours les mêmes grandes entreprises ainsi que des petites entreprises représentatives de la population. Nos grandeurs constituent donc de bonnes approximations de la population dans son ensemble.

Le Tableau 8 indique sous forme logarithmique l'intensité énergétique et ses deux composantes par branche (code NACE à deux chiffres). Premièrement, nous observons que l'intensité énergétique pondérée est inférieure à l'intensité énergétique non pondérée dans la plupart des branches, à l'exception de celles de la fabrication de meubles, du papier et des produits chimiques. Autrement dit, les entreprises économes en énergie détiennent une plus grande part de marché que leurs concurrentes énergivores dans 85 % des branches. Cela n'est guère surprenant. Les entreprises économes en énergie ont une facture énergétique moins élevée et, par conséquent, des coûts de production plus faibles<sup>40</sup>. La situation varie grandement d'une branche à l'autre. Le redéploiement de la production des entreprises énergivores vers celles économes en énergie est important

dans la fabrication de textiles, de produits métallurgiques de base, de produits minéraux non métalliques et de produits métalliques. À l'inverse, le phénomène est mineur dans la fabrication de boissons, d'articles en bois et de produits électroniques.

**Tableau 8 : Intensité énergétique et redéploiement de la production entre entreprises**

Code	Branche	Intensité énergétique pondérée	Intensité énergétique non pondérée	Redéploiement de la production
10	Produits alimentaires	0,014	0,039	-0,025
11	Boissons	0,048	0,056	-0,008
13	Textiles	0,005	0,050	-0,045
14	Articles d'habillement	0,005	0,015	-0,010
15	Cuir	0,003	0,011	-0,009
16	Articles en bois	0,029	0,032	-0,003
17	Papier	0,064	0,057	0,007
20	Produits chimiques	0,102	0,068	0,034
21	Produits pharmaceutiques	0,008	0,024	-0,015
22	Matières plastiques	0,013	0,031	-0,018
23	Produits minéraux non métalliques	0,061	0,092	-0,031
24	Produits métallurgiques de base	0,035	0,069	-0,034
25	Produits métalliques	0,002	0,028	-0,026
26	Produits électroniques	0,009	0,011	-0,002
27	Équipements électriques	0,004	0,014	-0,010
28	Machines et équipements	0,006	0,016	-0,010
29	Véhicules automobiles	0,007	0,020	-0,013
30	Autres matériels de transport	0,007	0,018	-0,011
31	Meubles	0,026	0,026	0,000

*Note : L'intensité énergétique et ses composantes telles que définies dans l'équation (8) sont exprimées sous forme logarithmique, moyenne calculée pour 2001-15.*

Si la variation des prix de l'énergie a un effet neutre sur l'emploi total d'une branche, elle n'est pas sans conséquence pour les travailleurs qui changent d'emploi.

<sup>40</sup> Le redéploiement de la production est positif dans la fabrication de meubles, l'industrie du papier et les produits chimiques du fait que les activités qui composent ces branches affichent une intensité énergétique très variable. Par exemple, le secteur du papier couvre la fabrication de la pâte à papier et du papier, activité énergivore, ainsi que l'édition, activité non énergivore. En général, les entreprises qui mènent des activités énergivores sont de plus grandes dimensions et représentent une part importante du secteur auquel elles appartiennent.

Les données ne permettent pas d'estimer l'effet d'une élévation des prix de l'énergie sur les émissions de carbone au niveau des branches. Il est toutefois vraisemblable que cet effet soit négatif dans la mesure où l'analyse microéconomique révèle un effet négatif à court terme sur les entreprises qui restent actives sur le marché et qu'un redéploiement de la production vers les entreprises économies en énergie est observé dans la plupart des branches d'activité.

**Tableau 9. Corrélation entre IPEPF, intensité énergétique agrégée et flux d'emplois agrégés**

	Taux de création brute d'emplois			Taux de destruction brute d'emplois			Taux de création nette d'emplois		
Redéploiement de la production vers les entreprises énergivores	-0,101 (0,129)			0,068 (0,077)			-0,17 (0,113)		
Moyenne simple	-0,007 (0,012)			0,003 (0,006)			-0,009 (0,014)		
Intensité énergétique	-0,034 (0,037)			0,008 (0,007)			-0,042 (0,039)		
Effets fixes au niveau de la branche	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Effets fixes temporels	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Observations	666	666	666	666	666	666	666	666	666
Nombre de branches	61	61	61	61	61	61	61	61	61
R <sup>2</sup> ajusté	0,10	0,10	0,11	0,38	0,38	0,38	0,19	0,19	0,20

*Note :* Chaque colonne correspond à une régression MCO. Les variables explicatives sont données sous forme logarithmique. Les erreurs types robustes clusterisées au niveau des codes NACE à trois chiffres sont indiquées entre parenthèses. \* p < 0,10 ; \*\* p < 0,05 ; \*\*\* p < 0,01.

## 5. Quantifier le redéploiement des salariés et la réduction des émissions

### 5.1. Contribution de la variation des prix de l'énergie au redéploiement des effectifs

Dans quelle proportion le redéploiement des salariés dans les branches d'activités est-il dû à l'évolution du prix de l'énergie ? Pour quantifier l'effet de la variation du prix de l'énergie sur le nombre d'emplois, nous procérons comme suit. Premièrement, nous calculons pour chaque branche  $k$  et chaque année  $t$  les effectifs correspondant à l'année  $t$  si le prix de l'énergie était le même qu'à l'année  $t-1$  :

$$\overline{EMP}_{kt} = \exp \left( \ln EMP_{kt} - \hat{\beta}_k (Cout_{kt} - Cout_{kt-1}) \right) \quad (9)$$

Où  $Cout_{kt} - Cout_{kt-1}$  désigne la variation observée du logarithme du coût moyen de l'énergie entre  $t-1$  et  $t$ , et  $\hat{\beta}_k$  l'élasticité de chaque branche d'activité telle qu'indiquée dans le tableau A.5<sup>41</sup>. Nous n'avons pas accès aux données de redéploiement de salariés pour chaque paire d'entreprise. Faute de disposer de ces données, nous utilisons la baisse brute en nombre de salariés en réaction à une augmentation du coût de l'énergie propre à la firme  $\hat{\beta}_k$  comme mesure du redéploiement de salariés<sup>42</sup>. La variation des effectifs due à l'évolution du prix de l'énergie s'exprime ainsi :

$$\Delta \overline{EMP}_{kt} = EMP_{kt} - \overline{EMP}_{kt} \quad (10)$$

Il convient de noter que la valeur de  $\Delta \overline{EMP}_{kt}$  peut être positive en cas de diminution du coût de l'énergie.

Enfin, nous calculons comme suit la variation des effectifs imputable au prix de l'énergie en pourcentage du niveau total des effectifs :

$$\varphi_{kt} = \frac{|\Delta \overline{EMP}_{kt}|}{EMP_{kt}}$$

Le Graphique 9 indique la moyenne établie pour 2005-16 de la valeur  $\varphi_{kt}$  de chaque activité<sup>43</sup>. Nous constatons qu'en moyenne, le redéploiement des salariés due à l'évolution du prix de l'énergie correspond à 0,25 % des effectifs totaux. La variation du prix de l'énergie contribue plus ou moins fortement au redéploiement des effectifs selon la branche. Cette contribution est importante dans la fabrication de produits alimentaires (0,73 %), de produits métallurgiques de base (0,61 %) et d'articles d'habillement (0,53 %), mais est très faible dans le cas des produits pharmaceutiques (0,07 %), du papier (0,05 %) et des textiles (0,04 %).

Ces disparités tiennent principalement au terme  $\hat{\beta}_k$ , que nous estimons, car la variation annuelle du coût de l'énergie est pratiquement identique pour toutes les branches (5,8 % en moyenne, avec un écart-type de 1,9 %). Par exemple, alors que le coût de l'énergie progresse de 5 % tant dans la fabrication de produits métallurgiques de base que dans la fabrication de machines et d'équipements, la proportion dans laquelle cette variation

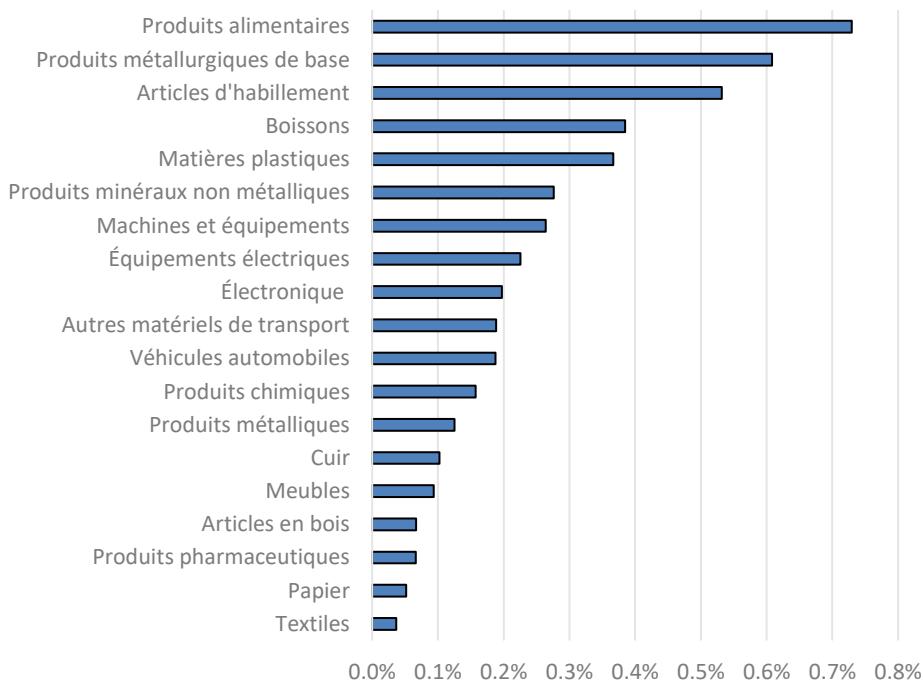
<sup>41</sup> Le coût de l'énergie a augmenté de 167 % en moyenne entre 2004 et 2016. Nous tenons compte également des élasticités qui ne sont pas statistiquement différentes de zéro.

<sup>42</sup> Nous utilisons ce même proxy pour l'exercice de simulation de la section 5.3.

<sup>43</sup> Nous ne remontons pas jusqu'à 2001 car avant 2004 certaines activités étaient absentes de la liste des établissements dressée par l'INSEE.

contribue au redéploiement de la main-d'œuvre va du simple au double selon que l'on considère la première ou la deuxième branche d'activité.

**Graphique 9. Redéploiement des salariés due à la variation des prix de l'énergie en pourcentage des effectifs totaux**



*Note : Part de la variation, moyenne établie pour 2005-16.*

### 5.2. Mesurer l'effet de la taxe carbone de 2013 à 2018

Dans cette section, nous estimons l'impact que la taxe carbone a eue sur les émissions de CO<sub>2</sub> et les effectifs du secteur manufacturier français entre 2014 et 2018.

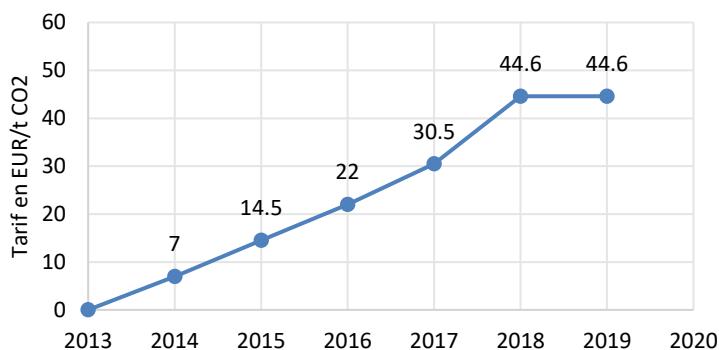
En 2014, la France s'est dotée d'une taxe carbone au taux de 7 EUR par tonne de CO<sub>2</sub>. Le

Graphique 10 illustre l'évolution du dispositif. Depuis sa mise en place, la taxe carbone a connu une ascension progressive jusqu'à atteindre 44,6 EUR par tonne de CO<sub>2</sub> en 2018. Chaque produit énergétique étant associé à un facteur d'émission distinct, la taxe sur le CO<sub>2</sub> se décline en différents taux par MWh propres à chaque produit énergétique.

Par exemple, pour une taxe carbone de 44,6 EUR par tonne de CO<sub>2</sub> en 2018, la tarification carbone appliquée au gaz naturel est de 8,45 EUR par MWh. Deux taux réduits ont toutefois été mis en place pour préserver la compétitivité des entreprises grandes consommatrices d'énergie. Le premier, égal à 1,52 EUR par MWh, bénéficie aux entreprises grandes consommatrices d'énergie qui relèvent du Système d'échange de quotas d'émission de l'Union européenne (SEQE-UE), le second, égal à 1,60 EUR

par MWh, à ceux qui sont exposés à un risque de fuite de carbone<sup>44</sup>. Aux termes de l'article 17 de la Directive 2003/96/CE, une entreprise grande consommatrice d'énergie est une entreprise dont les achats de produits énergétiques représentent au moins 3 % de la valeur de sa production ou dont le montant annuel dû au titre des taxes énergétiques représente plus de 0,5 % de sa valeur ajoutée. Enfin, les entreprises grandes consommatrices d'énergie qui relèvent du SEQE-UE ou qui sont exposées à un risque de fuite de carbone sont exemptées de la taxe carbone appliquée au fioul domestique et au butane-propane. Elles constituent respectivement 2,3 % et 10,1 % de notre échantillon.

**Graphique 10. Évolution de la taxe carbone mise en place en France**



*Note :* Données tirées de l'article 266 quinquies B du Code des douanes françaises, du projet de loi de finances pour 2018 et du projet de loi de finances pour 2019.

Ces exemptions ne sont pas prises en compte dans la présente section car nous appliquons le modèle sur des mesures d'émissions carbones et de nombre de salariés agrégés au niveau du secteur manufacturier. Par conséquent, les chiffres rapportés dans le Graphique 11

sont une estimation haute de l'effet de la taxe carbone. En revanche, nous tenons compte de ces exemptions et des taux réduits dans l'exercice de simulation consacré aux réallocations de salariés exposé dans la section 5.3. dans lequel nous partons des données d'entreprises.

Pour estimer l'effet de la taxe carbone sur le secteur manufacturier français, nous construisons un scénario contrefactuel pour le total des effectifs et des émissions de carbone. Dans ce scénario sans taxe carbone, le niveau des émissions est calculé comme suit :

$$CO2_t^{sans\ taxe} = \exp \left( \ln CO2_t^{taxe} - \hat{\beta}_1^{CO2} (\ln Cout_t^{taxe} - \ln Cout_t^{sans\ taxe}) \right)$$

Où  $CO2_t^{taxe}$  désigne les émissions effectivement produites par le secteur manufacturier français l'année  $t$ ,  $\hat{\beta}_1^{CO2}$  l'effet du coût de l'énergie sur les émissions de carbone, estimé à -0,92 comme indiqué dans le Tableau 1,  $Cout_t^{taxe}$  le coût de l'énergie lorsqu'il est

<sup>44</sup> La liste des secteurs exposés à un risque de fuite de carbone a été établie par la Décision n° 2014/746/UE du 27 octobre 2014.

tenu compte de la taxe carbone et  $Cout_t^{sans\ taxe}$  le coût de l'énergie en l'absence de taxe carbone.

Pareillement, le niveau contrefactuel des effectifs est calculé comme suit :

$$EMP_t^{sans\ taxe} = \exp \left( \ln EMP_t^{taxe} - \hat{\beta}_1^{EMP} (\ln Cout_t^{taxe} - \ln Cout_t^{sans\ taxe}) \right)$$

Où  $\hat{\beta}_1^{EMP}$  désigne l'effet du coût de l'énergie sur le niveau total des effectifs, qui est estimé à 0,114 comme indiqué dans le Tableau 7.

Nous calculons  $Cout_t^{sans\ taxe}$  en établissant la moyenne pondérée des prix de l'électricité, du gaz naturel, du fioul domestique et du butane-propane hors taxe carbone<sup>45</sup>. Le coefficient de pondération associé à un produit énergétique est égal à la part moyenne du produit énergétique concerné dans la consommation totale d'énergie du secteur manufacturier<sup>46</sup>. Nous calculons  $Cout_t^{taxe}$  en ajoutant le tarif de la taxe carbone au prix du produit énergétique correspondant<sup>47</sup>. Les données relatives à  $CO2_t^{taxe}$  et  $EMP_t^{taxe}$  proviennent de l'INSEE.<sup>48</sup>

Sur le Graphique 11, l'axe de gauche correspond à la taxe carbone (courbe verte) et l'axe de droite aux effets que la taxe carbone en France a sur les emplois (courbe violette) et les émissions de carbone (courbe rouge) du secteur manufacturier français. Lorsque la taxe carbone a été mise en place en 2014, au taux de 7 EUR la tonne de CO<sub>2</sub>, les émissions de carbone ont diminué de 1 %. En 2018, ce sont 3,6 Mt CO<sub>2</sub>, soit 5 %, qui ont été évitées, tandis que l'effet sur l'emploi total a été nettement moindre et positif (+0,8 %). Le Graphique 11

indique également sur l'axe de droite la différence (courbe orange) entre le deuxième budget carbone dans le secteur manufacturier au cours de la période 2019-23 et le niveau des émissions en l'absence de taxe.<sup>49</sup> Cette différence augmente dans le temps car d'autres facteurs de réduction des émissions s'ajoutent à la taxe carbone. Jusqu'en 2016 où les courbes rouge et orange finissent par se croiser, le taux de la taxe carbone était trop bas pour que le deuxième budget carbone puisse être respecté. Nous pouvons

<sup>45</sup> Nous utilisons des données relatives aux prix des combustibles tirées de la série chronologique SL\_T1 de l'EACEI, téléchargeable à l'adresse <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3702790?sommaire=3702794>. Nous intégrons les prix de 2018 en utilisant les prix de 2017. Nous convertissons tous les prix en EUR/MWh à l'aide des facteurs de conversion définis par l'ADEME.

<sup>46</sup> Comme indiqué dans la section relative aux données, l'électricité représente 58 % de la consommation d'énergie, le gaz naturel 28 %, le fioul domestique 6 % et le butane-propane 4 %. La somme de ces poids s'élève à 96 %, nous normalisons la pondération de façon à obtenir un total de 100 %.

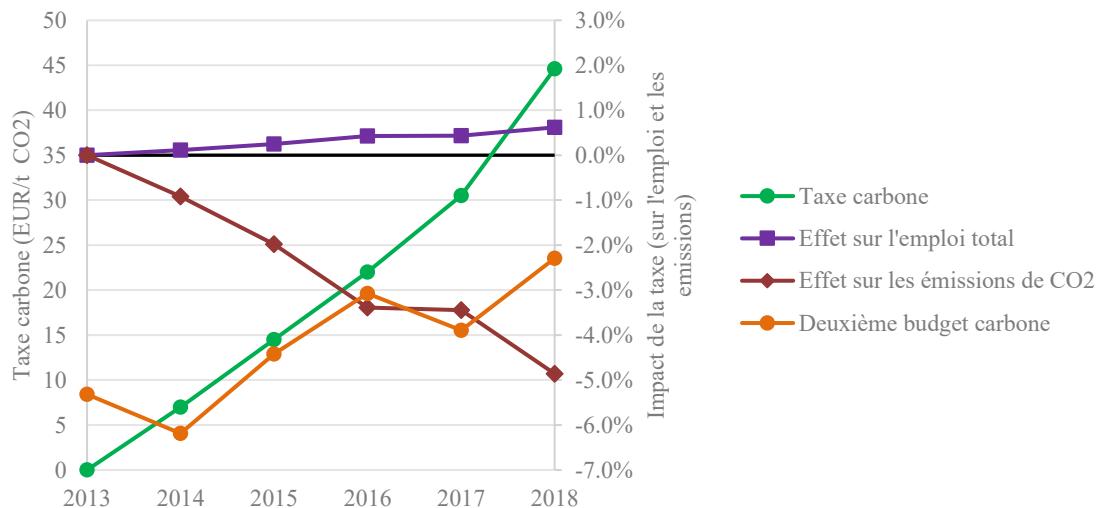
<sup>47</sup> Les données sur la taxe carbone proviennent de l'article 266 quinquies B du Code des douanes françaises, de la loi de finances pour 2018 et de la loi de finances pour 2019.

<sup>48</sup> Données disponibles à <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2015759> pour ce qui concerne les émissions de carbone et à <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/source/serie/s1283/bases-donnees-ligne> pour l'emploi.

<sup>49</sup> Cette courbe traduit le fait que même en l'absence de taxe carbone le deuxième budget carbone devient un objectif de plus en plus atteignable du fait de la baisse structurelle des émissions du secteur manufacturier.

conclure que la taxe carbone a permis d'atteindre cet objectif avant 2019 sans porter atteinte au niveau total de l'emploi manufacturier.

**Graphique 11. L'effet de la taxe carbone sur le secteur manufacturier français**



*Note : Calculs des auteurs à partir des coefficients estimés dans l'équation (1) et l'équation (7) et des données de l'Insee sur les émissions de carbone et l'emploi total du secteur manufacturier français.*

### 5.3. Quantifier les effets à court terme d'une éventuelle hausse de la taxe carbone

Dans cette section, nous simulons l'impact qu'une nouvelle hausse de la taxe carbone aurait à court terme sur les émissions de CO<sub>2</sub> et les redéploiements de salariés des entreprises, sans tenir compte des effets d'équilibre général dans la mesure où l'exercice se fonde sur l'analyse microéconomique. Autrement dit, ce dont il est rendu compte dans cette section correspond non pas à l'effet total de la taxe carbone sur les entreprises, mais à la situation qui attend l'entreprise moyenne de différentes branches à court terme.

Nous considérons un scénario dans lequel le taux de la taxe carbone passe de 44,6 EUR par tonne de CO<sub>2</sub> en 2018 à 86,2 EUR par tonne de CO<sub>2</sub>. Dans ce scénario, les taux réduits qui sont appliqués au gaz naturel évoluent dans la même proportion que le taux plein : le premier passe de 1,52 EUR à 2,88 EUR par MWh, et le second de 1,60 EUR à 3,03 EUR par MWh. Tout d'abord, à l'aide des données obtenues au niveau des entreprises pour la période 2012-16, nous calculons la variation du coût moyen de l'énergie due à la majoration de la taxe<sup>50</sup>. Puis, nous déterminons dans quelle proportion la réduction des émissions et le redéploiement des salariés est imputable à la variation du coût moyen de l'énergie en nous fondant sur nos estimations de l'élasticité spécifique à chaque branche qui figurent dans le tableau A.5.

<sup>50</sup> Nous retenons la dernière année pour laquelle nous disposons de données pour chaque entreprise. Remonter à 2012 permet de couvrir un nombre raisonnable d'entreprises, généralement de petite taille, qui ne figurent pas systématiquement dans l'échantillon constitué chaque année pour les besoins de l'enquête sur les consommations d'énergie.

Le Tableau 10 montre les résultats obtenus pour les 19 branches d'activités considérées dans notre échantillon d'estimations concernant 4 055 entreprises.<sup>51</sup> Dans le scénario fondé sur un taux de 86,2 EUR par tonne de CO<sub>2</sub>, le coût moyen de l'énergie augmente de 4,3 % en moyenne mais, naturellement, la situation varie grandement d'une branche à l'autre. La hausse est au moins égale à 5 % dans la fabrication d'autres matériels de transport, de machines et d'équipements et de textiles et inférieure à 3 % dans la fabrication d'articles en bois, de matières plastiques et de produits électroniques. L'entreprise moyenne réduit ses émissions de 41 tonnes de CO<sub>2</sub> et redéploie 0,4 équivalent temps plein (ETP) de personnel. Les plus fortes réductions d'émission de CO<sub>2</sub>, supérieures à 125 tonnes par entreprise, sont observées dans l'activité « fabrication des produits métallurgiques de base ». Le redéploiement de main-d'œuvre est en moyenne le plus important par entreprise, à hauteur de 1,3 ETP, dans l'activité « fabrication d'autres matériels de transport ». On notera toutefois que ces moyennes simples de branche sont déterminées par les grandes entreprises, qui sont surreprésentées dans notre échantillon<sup>52</sup>. Par conséquent, les chiffres indiqués ici témoignent généralement d'une surestimation de la réduction des émissions et du redéploiement de l'emploi.

Pour aller plus loin, nous indiquons un ordre de grandeur de l'effet étudié au niveau du secteur manufacturier. À cette fin, nous devons partir du principe que les petites entreprises de notre échantillon sont représentatives de la branche d'activité à laquelle elles appartiennent. Nous utilisons les données sur le nombre d'entreprises et leurs effectifs communiquées par l'INSEE. Pour déterminer le niveau total des réductions d'émissions, nous multiplions les effets marginaux de branche, tels qu'indiqués dans le Tableau 10, par le nombre total des entreprises des branches considérées<sup>53</sup>. Pour chaque branche, nous calculons le pourcentage moyen de l'effet sur l'emploi à partir des données relatives à la hausse du coût de l'énergie pour 2012-16 et des valeurs de l'élasticité de l'emploi indiquées dans le tableau A.5. Nous multiplions la variation en pourcentage associée à chaque branche par le nombre réel des salariés des entreprises. Les valeurs ainsi obtenues par entreprise sont ensuite additionnées pour donner une estimation de la variation totale correspondant à chacune des 19 branches d'activité étudiées. Ces résultats sont disponibles dans le Tableau 11.

Nous constatons qu'une élévation de la taxe carbone de 44,6 EUR à 86,2 EUR la tonne se traduit par une diminution des émissions de CO<sub>2</sub> de 6,2 millions de tonnes et un redéploiement de 6 357 ETP, ce qui représente respectivement 8,7 % du total des émissions et 0,24 % des salariés des 19 branches d'activité étudiées<sup>54</sup>. En valeur relative, les branches qui connaissent le plus fort redéploiement de salariés – au moins 0,3 % des effectifs – sont celles de la fabrication de produits métallurgiques de base, de produits alimentaires, de boissons, d'articles d'habillement, de matières plastiques ainsi que de machines et d'équipements. En valeur absolue, c'est l'industrie alimentaire qui contribue le plus à la réduction des émissions de carbone, avec 2,8 Mt CO<sub>2</sub>, suivie de la fabrication

<sup>51</sup> Ce nombre est plus faible que l'échantillon total de 8 000 entreprises car nous nous focalisons sur la période 2012-16.

<sup>52</sup> En effet, ces entreprises sont plus fréquemment retenues dans l'échantillon constitué aux fins de l'EACEI.

<sup>53</sup> Le nombre des entreprises françaises et de leurs salariés est communiqué par l'INSEE.

<sup>54</sup> Les branches d'activité que nous étudions représentent 83 % des émissions du secteur manufacturier français et 97 % de ses effectifs.

de produits minéraux non métalliques (757 000 tonnes de CO<sub>2</sub>), de produits métalliques (429 000 tonnes de CO<sub>2</sub>) et de boissons (402 000 tonnes de CO<sub>2</sub>).

On notera qu'il s'agit uniquement d'ordres de grandeur et non d'estimations précises. Les effets d'équilibre général, tels que l'arrivée de nouvelles entreprises sur le marché imputable à la montée du prix de l'énergie, ne sont pas pris en compte dans ce modèle microéconométrique.

Pourquoi une multiplication par deux du taux de la taxe carbone aurait-il un effet d'une telle magnitude sur le niveau total des émissions de CO<sub>2</sub> et de l'emploi ? Cela tient principalement au niveau relativement faible de la hausse induite du coût de l'énergie, entre 2,1 % et 6,8 %, pour deux raisons. Premièrement, les combustibles fossiles ne représentent en moyenne que 36 % de la consommation totale d'énergie. Deuxièmement, la part des combustibles fossiles dans la consommation d'énergie des entreprises bénéficiaires de taux réduits de la taxe carbone s'élève à 16,4 % en moyenne et dépasse 30 % dans certaines branches d'activité particulièrement exposées à la concurrence étrangère, comme la fabrication de textiles, d'articles en bois et de produits métallurgiques de base<sup>55</sup>.

Dans le scénario « Avec mesures supplémentaires » (AMS) élaboré dans le cadre de la Stratégie nationale bas carbone de la France, le premier budget carbone (2015-18) du secteur manufacturier a été fixé à 80 Mt CO<sub>2</sub> et le deuxième (2019-23) à 72 Mt CO<sub>2</sub>. Le respect du deuxième budget carbone exige de réduire les émissions de carbone de 4 Mt CO<sub>2</sub> par rapport au niveau de 2013. Notre simulation montre qu'en faisant passer le taux plein de la taxe carbone de 44,6 EUR à 86,2 EUR la tonne de CO<sub>2</sub> et qu'en accroissant dans une proportion identique le taux réduit qui est appliqué au gaz naturel, on obtient une diminution des émissions de carbone de l'ordre de 6,2 Mt CO<sub>2</sub>. Dans la section 5.2. , nous estimons que l'application du taux fixé à 44,6 EUR par tonne de CO<sub>2</sub> a déjà permis de respecter le deuxième budget carbone dans sa quasi-totalité puisque la réduction des émissions a atteint 3,6 Mt CO<sub>2</sub> en 2018.

La réduction restante de 0,4 Mt CO<sub>2</sub> sera probablement obtenue par l'augmentation du prix du quota d'émission en vigueur dans le SEQE-UE, qui ne cesse de croître depuis début 2018, où il était de 7 EUR contre 25 EUR en juin 2019.

---

<sup>55</sup> Se reporter au tableau 10 pour des données statistiques par branche.

**Tableau 10. Effet d'une hausse de la taxe carbone sur les émissions et les effectifs des entreprises constitutives de notre échantillon**

Code	Intitulé de l'activité	Nombre d'entreprises	Combustibles fossiles (en % de la consommation d'énergie)	Usages de combustibles fossiles exonérés (en % de la consommation totale de l'activité)	Hausse du coût de l'énergie (en %)	Réduction des émissions de CO <sub>2</sub>		Redéploiement des salariés	
						(t CO <sub>2</sub> / entreprise)	(%)	(ETP par entreprise)	(en %)
10	Produits alimentaires	483	35,3	1,8	4,89	46,47	1,44	0,78	0,35
11	Boissons	55	33,9	13,5	4,38	110,16	3,44	0,93	0,32
13	Textiles	153	45,4	63,5	5,02	21,08	2,03	0,03	0,03
14	Articles d'habillement	40	43,2	16,4	4,76	22,11	2,70	0,69	0,29
15	Cuir	34	41,2	7,4	4,46	3,92	1,10	0,20	0,06
16	Articles en bois	188	17,2	67,6	2,06	21,16	1,28	0,02	0,02
17	Papier	257	36,6	44,1	3,89	71,57	1,91	0,05	0,04
20	Produits chimiques	322	43,9	9,9	4,80	88,01	1,50	0,27	0,16
21	Produits pharmaceutiques	80	42,3	10,8	4,75	19,57	0,31	0,55	0,09
22	Matières plastiques	448	21,8	10,5	2,81	16,00	0,64	0,57	0,21
23	Produits minéraux non métalliques	328	45,1	11,3	3,97	71,66	1,17	0,29	0,21
24	Produits métallurgiques de base	205	41,8	34,0	3,80	124,74	1,59	0,91	0,44
25	Produits métalliques	753	35,8	6,3	4,70	18,54	1,11	0,16	0,12
26	Produits électroniques	50	17,9	3,5	2,05	9,55	0,78	0,49	0,09
27	Équipements électriques	167	38,4	19,2	4,64	25,15	1,45	0,72	0,22

28	Machines et équipements	230	45,2	9,5	5,83	22,48	1,64	0,88	0,30
29	Véhicules automobiles	183	30,9	2,4	3,98	13,06	0,65	0,55	0,16
30	Autres matériels de transport	16	51,4	0	6,77	-147,60	-2,61	1,33	0,14
31	Meubles	63	36,3	0	4,89	19,40	2,22	0,08	0,05
	Moyenne pondérée	4 055	35,9	16,4	4,26	41,02	1,30	0,43	0,19

Note : Les quantités indiquées dans ce tableau sont estimées sur la base de la valeur absolue des coefficients du tableau A.5. et de la hausse du coût moyen de l'énergie due à la majoration de la taxe carbone, calculée par simulation pour chaque entreprise. Dans ce scénario, le taux de la taxe carbone passe de 44,6 EUR à 86,2 EUR la tonne de CO<sub>2</sub>.

**Tableau 11. Extrapolation des effets d'une majoration de la taxe carbone sur les émissions de CO<sub>2</sub> et les redéploiements de salariés**

Code	Intitulé de l'activité	Nombre d'entreprises	Nombre de salariés	Redéploiement des salariés (ETP)	Réduction des émissions (en milliers de tonnes de CO <sub>2</sub> )
10	Produits alimentaires	59 421	581 509	2 451	2 761
11	Boissons	3 650	44 526	156	402
13	Textiles	6 435	46 801	17	136
14	Articles d'habillement	16 740	54 735	187	370
15	Cuir	3 029	32 291	25	12
16	Articles en bois	11 673	71 865	22	247
17	Papier	1 919	66 483	25	137
20	Produits chimiques	3 606	143 048	286	317
21	Produits pharmaceutiques	464	75 878	73	9
22	Matières plastiques	4 520	169 466	426	72
23	Produits minéraux non métalliques	10 558	113 327	265	757
24	Produits métallurgiques de base	1 247	92 361	431	156
25	Produits métalliques	23 122	315 629	490	429
26	Produits électroniques	3 672	133 473	119	35
27	Équipements électriques	2 952	112 815	251	74
28	Machines et équipements	6 298	183 118	514	142
29	Véhicules automobiles	2 242	206 937	350	29
30	Autres matériels de transport	1 289	148 656	248	-190
31	Meubles	13 748	53 754	21	267
	Total	176 585	2 646 672	6 357	6 162

Note : Les quantités indiquées dans ce tableau ont été déterminées par extrapolation à partir des données du tableau A.5. et de la structure des effectifs du secteur manufacturier français. On notera qu'il s'agit de totaux et non de moyennes. Les activités dont le coefficient est statistiquement non significatif ont été prises en compte dans ces calculs.

## 6. Conclusions et travaux futurs possibles

La présente étude repose sur un nouvel ensemble de données construit à partir d'informations microéconomiques recueillies auprès d'entreprises manufacturières françaises. Elle apporte de nouveaux éléments qui permettent d'évaluer l'effet de l'évolution des prix de l'énergie sur la performance économique et environnementale des entreprises. Le problème de l'endogénéité des dépenses énergétiques des entreprises est résolu au moyen d'une méthode de variables instrumentales fondée sur la variation exogène des prix de l'énergie au niveau des branches d'activité.

D'après les résultats ainsi obtenus, une hausse de 10 % des coûts de l'énergie fait fléchir la consommation d'énergie de 6 % et les émissions de carbone de 9 %. En intégrant les ajustements interentreprises dans l'analyse par activité, nous constatons que la hausse du coût de l'énergie n'a pas d'effet statistiquement significatif sur la création nette d'emplois. Nous montrons que cela est dû à un redéploiement de la production et des

effectifs salariés des entreprises de grande taille et intensives en énergie vers les entreprises économies en énergie. Ce résultat macroéconomique est cohérent avec l'analyse réalisée au niveau des entreprises, de laquelle il ressort que le nombre de salariés de certaines grandes et moyennes entreprises peuvent diminuer avec la hausse des prix de l'énergie. Cela dit, ils diminuent dans une proportion nettement plus faible (2,6-5,6 %) que les émissions de CO<sub>2</sub>, ce qui donne des raisons de penser que les entreprises touchées parviennent à faire baisser leur intensité énergétique autrement qu'en diminuant leurs effectifs. À la différence des grandes entreprises, les petites entreprises (qui représentent une part élevée du nombre total d'entreprises) qui restent actives sur le marché ne procèdent pas à des diminutions d'effectifs lorsque le prix de l'énergie augmente<sup>56</sup>.

Ces résultats nous permettent de conclure que les instruments de tarification du carbone (tels que la taxe carbone) qui font grimper le coût de l'énergie provoquent un redéploiement de main-d'œuvre entre entreprises et branches d'activité, sans pour autant faire diminuer le nombre total des emplois du secteur manufacturier. Le redéploiement des salariés est relativement important dans les branches de la fabrication de produits métallurgiques de base, de produits alimentaires, de boissons, d'articles d'habillement, de matières plastiques ainsi que de machines et d'équipements<sup>57</sup>. Ses effets redistributifs et les coûts supportés par les travailleurs licenciés mettent en évidence le besoin de disposer de politiques complémentaires sur le marché du travail qui atténuent les impacts de ces ajustements d'effectifs interentreprises.

Nous constatons qu'au taux de 44,6 EUR par tonne de CO<sub>2</sub>, la taxe carbone s'est accompagnée d'une baisse de émissions de l'ordre d'environ 3,6 Mt en 2018 par rapport à 2013. Nous relevons également que si la taxe carbone française passait de 44,6 EUR à 86,2 EUR par tonne de CO<sub>2</sub>, les émissions du secteur manufacturier diminueraient de 6,2 Mt de CO<sub>2</sub> supplémentaires. Ce chiffre est cohérent avec l'objectif énoncé dans la Stratégie nationale bas carbone, qui est de réduire le budget carbone du secteur manufacturier en le faisant passer de 80 Mt CO<sub>2</sub> pour la période 2015-18 à 72 Mt CO<sub>2</sub> pour la période 2019-23. La réduction restante de 0,4 Mt CO<sub>2</sub> sera probablement obtenue par une augmentation supplémentaire du prix du quota d'émission en vigueur sur le marché européen, en hausse constante depuis le début de l'année 2018.

Par ailleurs, nos résultats indiquent que les technologies produites et employées par les entreprises changent sous l'effet de la hausse des prix de l'énergie. Les grandes entreprises innovent davantage (au regard du nombre de dépôts de brevets) tandis que toutes investissent plus massivement dans les technologies en bout de chaîne de lutte contre la pollution.

Aussi instructifs soient-ils, les résultats de l'étude rendent nécessaire d'engager des travaux de recherche supplémentaires pour tirer des enseignements plus utiles sur l'action à mener.

- Premièrement, faute de données sur la production au niveau des établissements, nous n'analysons pas le rôle potentiellement important du redéploiement de la

---

<sup>56</sup> Il est néanmoins possible qu'une partie des petites entreprises quittent le marché en réaction à l'élévation du coût de l'énergie, ce que nous ne sommes toutefois pas en mesure de vérifier.

<sup>57</sup> Nombre d'emplois redéployés par rapport au nombre total des emplois. L'ampleur du redéploiement observé dans l'industrie alimentaire tient principalement au fait qu'il s'agit de la plus grande branche d'activité en France.

production entre établissements d'une même entreprise dans la variation de l'intensité énergétique intra-entreprise. Même si l'effet emploi est modeste au niveau de l'entreprise, le redéploiement de la production et des effectifs entre établissements n'est pas sans conséquences redistributives.

- Deuxièmement, l'absence de données quantitatives sur la production nous empêche d'analyser l'effet du prix de l'énergie sur la productivité totale des facteurs et les prix de la production.
- Troisièmement, il faudrait disposer de plus de données sur les émissions d'autres polluants pour comprendre l'effet net de la fiscalité de l'énergie sur la pollution totale.
- Enfin, nous avons laissé de côté la question de la délocalisation, mécanisme d'ajustement potentiellement important pour les entreprises confrontées à une hausse des prix de l'énergie.

## Références

- Acs, Z., D. Audretsch et B. Carlson (1991), « Flexible technology and firm size », *Small Business Economics*, vol 3, pp. 307–320.
- Aigner, K. et G. Tichy (1991), « Small firms and the merger mania », *Small Business Economics*, vol. 3, pp. 83–101.
- Alexeeva-Talebi, V. (2011), « Cost pass-through of the EU emissions allowances: Examining the european petroleum markets », *Energy Economics*, vol. 33, pp. S75–S83.
- Al-Sahlawi, M.A. (1989), « The Demand for Natural Gas: a Survey of Price and Income Elasticities », *The Energy Journal*, pp. 77–90.
- Anderson, S.T. et R.G. Newell (2004), « Information Programs for Technology Adoption: The Case of Energy-Efficiency Audits », *Resource and Energy Economics*, vol. 26, n° 1, pp. 27–50.
- Arnberg, S. et T.B. Bjørner (2007), « Substitution between energy, capital and labour within industrial companies: A micro panel data analysis », *Resource and Energy Economics*, vol. 29, n° 2, pp. 122–136.
- Barakat, M. (2011), « New Trends in Removing Heavy Metals from Industrial Wastewater », *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 4, n° 4, pp. 361–377.
- Bassi, S., A. Dechezleprêtre et S. Fankhauser (2013), « Climate change policies and the UK business sector: overview, impacts and suggestions for reform », *Policy Paper*, Centre for Climate Change Economics and Policy, Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment.
- Berndt, E.R. et D.O. Wood (1975), « Technology, Prices, and the Derived Demand for Energy », *The Review of Economics and Statistics*, vol. 57, n° 3, pp. 259–268.
- Blundell, R. et T.M. Stoker (2007), « Models of aggregate economic relationships that account for heterogeneity », *Handbook of Econometrics*, vol. 6, pp. 4609–4666.
- Bohi, D.R. et M.B. Zimmerman (1984), « An update on econometric studies of energy demand behavior », *Annual Review of Energy*, vol. 9, n° 1, pp. 105–154.
- Bradbard, R.M. et D.R. Ross (1989), « Can small firms find and defend niches? A test of the porter hypothesis », *The Review of Economics and Statistics*, vol. 71, pp. 258–262.
- Brons, M. et al. (2008), « A meta-analysis of the price elasticity of gasoline demand: A SUR approach », *Energy Economics*, vol. 30, n° 5, pp. 2105–2122.
- Brucal, A., I. Love et B. Javorcik (2018), « Energy savings through foreign acquisitions? Evidence from indonesian manufacturing plants », *GRI Working Papers*, Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment.
- Caves, R. et D. Barton (1990), Efficiency in US Manufacturing Industries, *MIT Press, Cambridge*.

- Czarnitzki, D. et H. Hottenrott (2011), « R&D investment and financing constraints of small and medium-sized firms », *Small Business Economics*, vol. 36, n° 1, pp. 65-83.
- Davis, S.J. et J. Haltiwanger (1992), « Gross job creation, gross job destruction, and employment reallocation », *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 107, n° 3, pp. 819-863.
- Englehardt, J.D. (1993), « Pollution prevention technologies: A review and classification », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 35, n° 1, pp. 119-150.
- Espey, M. (1996), « Explaining the variation in elasticity estimates of gasoline demand in the United States: a meta-analysis », *The Energy Journal*, pp. 49-60.
- Flues, F. et B.J. Lutz (2015), « Competitiveness impacts of the German electricity tax », *OECD Environment Working Papers*, vol. 88, p. 1.
- Gayer, T. et W.K. Viscusi (2013), « Overriding consumer preferences with energy regulations », *Journal of Regulatory Economics*, vol. 43, n° 3, pp. 248-264.
- Gerster, A. (2015), *Do electricity prices matter: Plant-level evidence from German manufacturing*, manuscrit non publié, disponible à l'adresse : <https://ssrn.com/abstract=2603211> ou <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2603211>.
- Greenstone, M. et al. (2012), The Effects of Environmental Regulation on the Competitiveness of US Manufacturing, Technical report, National Bureau of Economic Research.
- Gude, V.G. (2012), « Energy consumption and recovery in reverse osmosis », *Desalination and Water Treatment*, vol. 36, pp. 239-260.
- Hansen, J.A. (1992), « Innovation, firm size and firm age », *Small Business Economics*, vol. 4, pp. 37-44.
- Havranek, T. et al. (2012), « Demand for gasoline is more price-inelastic than commonly thought », *Energy Economics*, vol. 34, n° 1, pp. 201-207.
- Holland, S.P. (2012), « Emissions taxes versus intensity standards: Second-best environmental policies with incomplete regulation », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 63, n° 3, pp. 375-387.
- Hottenrott, H. et B. Peters (2012), « Innovative capability and financing constraints for innovation: More money, more innovation? », *Review of Economics and Statistics*, vol. 94, n° 4, pp. 1126-1142.
- Houthakker, H.S. (1951), « Some calculations on electricity consumption in Great Britain », *Journal of the Royal Statistical Society, Series A (General)*, vol. 114, n° 3, pp. 359-371.
- Agence internationale de l'énergie (2017), *Energy Policies of IEA Countries: France 2016*, Agence internationale de l'énergie, disponible à l'adresse : <https://doi.org/10.1787/9789264279445-en>.
- Jacobsen, G.D. (2015), « Do energy prices influence investment in energy efficiency? Evidence from energy star appliances », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 74, pp. 94-106.

- Keller, W. (2004), « International Technology Diffusion », *Journal of Economic Literature*, vol. 42, pp. 752–782.
- Labandeira, X. et al. (2017), « A meta-analysis on the price elasticity of energy demand », *Energy Policy*, vol. 102, pp. 549–568.
- Linn, J. (2008), « Energy prices and the adoption of energy-saving technology », *The Economic Journal*, vol. 118, n° 533, pp. 1986–2012.
- Lise, W., J. Sijm et B.F. Hobbs (2010), « The Impact of the EU ETS on Prices, Profits and Emissions in the Power Sector: Simulation Results with the COMPETES EU20 model », *Environmental and Resource Economics*, vol. 47, n° 1, pp. 23–44.
- Marin, G. et F. Vona (2017), « The Impact of Energy Prices on Employment and Environmental Performance: Evidence from French Manufacturing Establishments », *Working Paper 053.2017*, Fondazione Eni Enrico Mattei.
- Martin, R., L.B. De Preux et U.J. Wagner (2014), « The impact of a carbon tax on manufacturing: Evidence from microdata », *Journal of Public Economics*, vol. 117, pp. 1–14.
- Mussatti, D. C. et P.M. Hemmer (2002), Epa air pollution control cost manual, wet scrubbers for particulate matter, Technical report, Agence pour la protection de l'environnement des Etats-Unis.
- Mussatti, D.C. et al. (2000), Epa air pollution control cost manual, selective noncatalytic reduction, Technical report, Agence pour la protection de l'environnement des Etats-Unis.
- Pertrick, S. et U. Wagner (2018), The impact of Carbon Trading on Industry: Evidence from German manufacturing firms, disponible à l'adresse : <https://ssrn.com/abstract=2389800> ou <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2389800>.
- Pizer, W.A. et al. (2001), « Technology adoption and aggregate energy efficiency », *Resources for the Future Discussion Paper*, pp. 1–21.
- Porter, M.E. et C. Van der Linde (1995), « Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship », *Journal of economic perspectives*, vol. 9, n° 4, pp. 97–118.
- Sadorsky, P. (2008), « Assessing the impact of oil prices on firms of different sizes: It's tough being in the middle », *Energy Policy*, vol. 36, n° 10, pp. 3854–3861.
- Sato, M. et al. (2015), International and sectoral variation in energy prices 1995-2011: how does it relate to emissions policy stringency?, Centre for Climate Change Economics and Policy, *Working Paper* n° 212.
- Sijm, J. et al. (2008), The impact of the EU ETS on electricity prices: final report to DG Environment of the European Commission, Technical report, Energy research Centre of the Netherlands ECN.
- Taylor, L.D. (1975), « The demand for electricity: a survey », *The Bell Journal of Economics*, pp. 74–110.

Vatatuks et al. (2000), EPA Air Pollution Control Cost Manual, VOC Destruction Controls, Incinerators, Technical report, Agence pour la protection de l'environnement des Etats-Unis.

Wagner, U.J. et al. (2014), The Causal Effects of the European Union Emissions Trading Scheme: Evidence from French Manufacturing Plants, in *Fifth World Congress of Environmental and Resources Economists*, Istanbul, Turquie, Citeseer.

Walker, W.R. (2013), « The Transitional Costs of Sectoral Reallocation: Evidence From the Clean Air Act and the Workforce », *The Quarterly journal of economics*, vol. 128, n° 4, pp. 1787–1835.

Woodland, A.D. (1993), A Micro-Econometric Analysis of the Industrial Demand for Energy in NSW, *The Energy Journal*, pp. 57–89.

## Annexe A. Tableaux et graphiques complémentaires

### Statistiques de synthèse

Tableau A.1. Statistiques de synthèse pour l'échantillon constitué au niveau des entreprises

Variable	Obs.	Moyenne	Écart-type	Min	Max
Stock de familles de brevets	29 683	-0,26	1,92	-6,49	7,01
Consommation d'énergie	48 309	5,88	1,70	-6,31	13,73
Consommation d'électricité	48 300	5,24	1,64	-6,31	12,36
Consommation de combustibles fossiles	42 963	5,00	1,93	-2,79	13,67
Émissions de CO <sub>2</sub>	48 309	13,10	1,87	0,05	21,60
Nombre de salariés	48 309	4,70	1,06	0,00	10,15
Production réelle	48 309	9,86	1,34	3,05	16,53
Investissement	38 932	6,02	1,81	-0,64	13,54
Intensité énergétique réelle	48 309	-3,98	1,17	-14,63	1,63
Consommation d'énergie par employé	48 309	1,18	1,23	-9,65	8,17
Consommation d'énergie par unité d'intrant physique	48 309	-2,86	1,45	-13,81	9,55
Consommation d'énergie par unité de capital	48 309	-2,85	1,20	-13,11	4,28
Électricité / Combustibles fossiles	42 954	0,34	1,39	-5,39	10,30
Coût moyen de l'énergie	48 309	-0,44	0,34	-5,96	5,84
Âge de l'entreprise en années	48 309	2,54	2,67	0,00	11,50
SEQE (0/1)	48 309	0,02	0,13	0,00	1,00
Indice des prix de l'énergie (IPEPF)	48 309	-0,43	0,29	-1,53	0,55
Petites entreprises (> 20 et < 50 employés)	48 309	0,30	0,46	0,00	1,00
Grandes entreprises (> 250 employés)	48 309	0,21	0,41	0,00	1,00
Année	48 309	2008,84	4,36	2001	2016

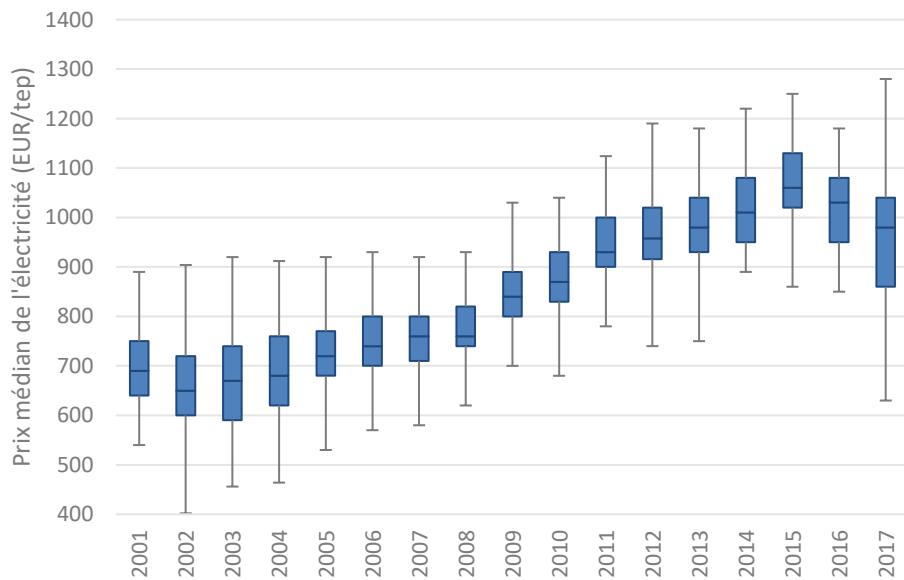
Note : L'unité d'observation est l'entreprise. Toutes les variables sont exprimées sous forme logarithmique sauf l'âge de l'entreprise et la variable binaire du SEQE.

**Tableau A.2. Statistiques de synthèse pour l'échantillon constitué au niveau des établissements**

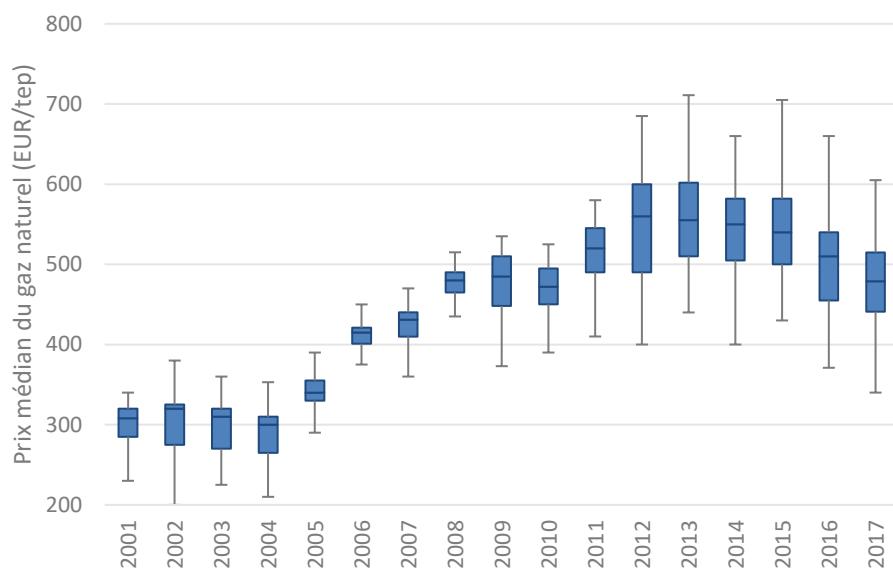
Variable	Obs.	Moyenne	Écart-type	Min	Max
Investissements destinés à réduire toutes les formes de pollution	18 135	3,57	1,72	-2,34	10,28
Investissements destinés à réduire la pollution de l'eau	18 135	2,47	1,89	-4,30	9,83
Investissements destinés à réduire la pollution de l'air	14 501	2,50	1,99	-4,43	9,94
Investissements destinés à réduire la pollution par les déchets	16 953	1,95	1,68	-5,23	9,33
Investissements destinés à réduire la pollution des sols	15 198	1,94	1,95	-4,70	9,54
Indice des prix de l'énergie (IPEPF)	18 135	-0,59	0,30	-1,73	0,25
Âge de l'établissement en années	18 135	30,33	35,83	0	114,00
SEQE (0/1)	18 135	0,05	0,21	0	1

*Note :* L'unité d'observation est l'établissement. Toutes les variables sont exprimées sous forme logarithmique sauf l'âge de l'entreprise et la variable binaire du SEQE.

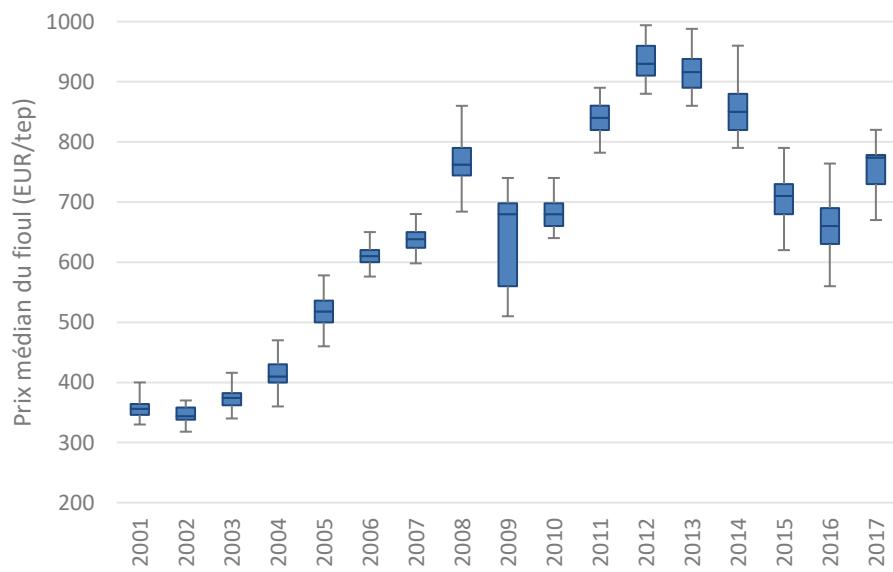
## Évolution de la variation inter-branches des prix des produits énergétiques

**Graphique A.1. Évolution de la distribution du prix médian de l'électricité**

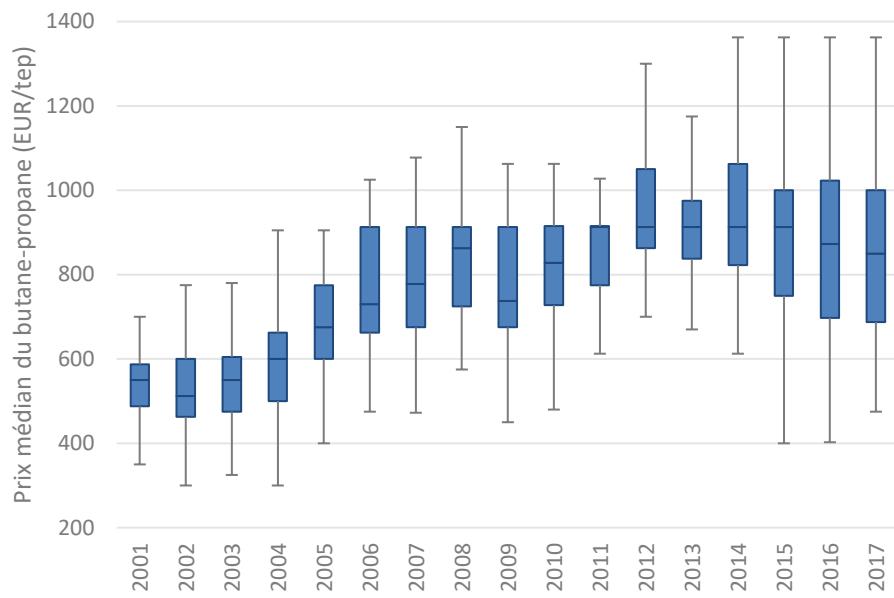
*Note :* La médiane est calculée pour chaque branche associée à un code à trois chiffres.

**Graphique A.2. Évolution de la distribution du prix médian du gaz naturel**

Note : La médiane est calculée pour chaque branche associée à un code à trois chiffres.

**Graphique A.3. Évolution de la distribution du prix médian du fioul domestique**

Note : La médiane est calculée pour chaque branche associée à un code à trois chiffres.

**Graphique A.4. Évolution de la distribution du prix médian du butane-propane**

*Note :* La médiane est calculée pour chaque branche associée à un code à trois chiffres.

## Variation intra-branche des prix des produits énergétiques

Tableau A.3. Variation intra-branche des prix des produits énergétiques

Code	Branche	Électricité			Gaz naturel			Fioul domestique			Butane-propane		
		Moyenne	Écart-type	CV (%)	Moyenne	Écart-type	CV (%)	Moyenne	Écart-type	CV (%)	Moyenne	Écart-type	CV (%)
10	Produits alimentaires	957	195	20 %	491	138	28 %	718	238	33 %	649	417	64 %
11	Boissons	1 046	305	29 %	518	117	23 %	717	195	27 %	717	408	57 %
13	Textiles	1 112	437	39 %	526	150	29 %	661	108	16 %	951	387	41 %
14	Articles d'habillement	1 243	346	28 %	619	169	27 %	806	497	62 %	894	646	72 %
15	Cuir	1 195	223	19 %	558	128	23 %	591	72	12 %	949	553	58 %
16	Articles en bois	1 155	268	23 %	579	176	31 %	726	226	31 %	1 005	830	83 %
17	Papier	1 013	255	25 %	505	167	33 %	700	184	26 %	894	357	40 %
20	Produits chimiques	1 024	239	23 %	502	212	42 %	764	537	70 %	1 000	868	87 %
21	Produits pharmaceutiques	923	120	13 %	472	87	19 %	790	314	40 %	1 211	436	36 %
22	Matières plastiques	993	221	22 %	603	192	32 %	721	258	36 %	980	514	52 %
23	Produits minéraux non métalliques	1 058	302	29 %	578	1 082	187 %	705	189	27 %	926	530	57 %
24	Produits métallurgiques de base	890	224	25 %	441	120	27 %	737	226	31 %	979	711	73 %
25	Produits métalliques	1 107	274	25 %	580	205	35 %	779	736	94 %	942	557	59 %
26	Produits électroniques	1 011	200	20 %	592	199	34 %	744	230	31 %	1 360	519	38 %
27	Équipements électriques	1 065	220	21 %	531	121	23 %	775	357	46 %	1 004	586	58 %
28	Machines et équipements	1 059	221	21 %	544	120	22 %	767	263	34 %	985	496	50 %
29	Véhicules automobiles	953	195	20 %	521	132	25 %	863	559	65 %	846	391	46 %
30	Autres matériels de transport	1 095	374	34 %	552	165	30 %	755	278	37 %	992	463	47 %
31	Meubles	1 090	225	21 %	544	107	20 %	591	91	15 %	653	202	31 %
Moyenne toutes branches		1 052	255	24 %	540	199	36 %	732	293	39 %	944	519	55 %

Note : Les calculs des auteurs sont fondés sur l'année 2016. Toutes les valeurs sont exprimées en EUR par tonne d'équivalent pétrole (tep). CV = coefficient de variation.

## Synthèse des variations intra-branche et inter-branches des prix des produits énergétiques

**Tableau A.4. Distribution du prix médian au niveau des branches identifiées par un code à trois chiffres**

Produit énergétique	Obs.	Moyenne	Écart-type	p10	p90	CV (%)	Hausse (%)
Électricité	67	1 013	113	879	1 138	11 %	47 %
Gaz naturel	67	506	70	416	578	14 %	67 %
Fioul domestique	67	677	109	598	766	16 %	88 %
Butane-propane	67	871	269	565	1 166	31 %	59 %

*Note :* La hausse est égale au rapport entre le prix du produit en 2016 et le prix du produit en 2001 moins 1.

## Effets propres à chaque branche de la variation des prix de l'énergie sur les émissions de carbone et les effectifs

Tableau A.5. Élasticités des émissions de CO<sub>2</sub> et des effectifs, par branche

Code	Branche	Nombre d'entreprises	Intensité énergétique moyenne (tep/kEUR)	Énergie en % du chiffre d'affaires	Émissions de CO <sub>2</sub>		Effectif	
					Coeff.	Erreur-type	Coeff.	Erreur-type
10	Produits alimentaires	1 282	36	1,7 %	-0,309***	0,098	-0,075*	0,042
11	Boissons	139	27	1,2 %	-0,833*	0,434	0,075	0,121
13	Textiles	309	47	2,7 %	-0,432***	0,148	-0,007	0,033
14	Articles d'habillement	161	15	1,0 %	-0,603***	0,189	-0,063	0,051
15	Cuir	103	11	0,7 %	-0,256	0,221	0,015	0,082
16	Articles en bois	370	33	1,9 %	-0,651***	0,129	-0,012	0,048
17	Papier	517	55	2,4 %	-0,517***	0,112	-0,011	0,027
20	Produits chimiques	521	67	2,8 %	-0,329**	0,13	-0,034	0,026
21	Produits pharmaceutiques	81	24	1,9 %	-0,068	0,194	-0,02	0,06
22	Matières plastiques	891	31	2,0 %	-0,236***	0,075	-0,078***	0,026
23	Produits minéraux non métalliques	541	87	4,0 %	-0,310***	0,112	-0,055**	0,023
24	Produits métallurgiques de base	314	69	3,4 %	-0,441***	0,165	-0,122**	0,049
25	Produits métalliques	1 402	28	1,7 %	-0,247***	0,072	-0,027*	0,015
26	Produits électroniques	151	12	0,9 %	-0,391**	0,197	0,043	0,053
27	Équipements électriques	278	14	0,8 %	-0,327**	0,154	-0,049	0,046
28	Machines et équipements	435	15	0,9 %	-0,296***	0,104	0,053	0,032
29	Véhicules automobiles	287	18	1,3 %	-0,170	0,150	-0,041	0,039
30	Autres matériels de transport	35	20	1,2 %	0,395	0,300	0,022	0,098
31	Meubles	182	21	1,4 %	-0,481***	0,140	-0,01	0,052

Note : Erreurs types robustes clusterisées au niveau des entreprises indiquées entre parenthèses. \* p < 0,10  
; \*\* p < 0,05 ; \*\*\* p < 0,01.

## Annexe B. Test statistique de la faiblesse éventuelle des instruments

La convergence des estimations qui précèdent dépend de la robustesse de notre variable instrumentale. Le test de Kleibergen Paap donne un résultat statistiquement différent de zéro dans toutes les régressions<sup>58</sup>. Nous pouvons donc rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle l'IPEPF est une variable instrumentale faible. Le tableau B.5 donne les résultats de l'estimation de la première étape. À la première étape d'estimation du modèle (1), le coefficient de l'IPEPF est égal à 0,583 et statistiquement différent de zéro au niveau de 1 %. De plus, le test F donne une statistique égale à 173, ce qui est bien supérieur au seuil de 10 généralement utilisé. On conclut de la même façon que les variables instrumentales du modèle (2) sont fortes.

**Tableau B.1. Régressions de première étape**

	Modèle (1)	Modèle (2)		
	ln(coût moyen de l'énergie)	ln(coût moyen de l'énergie)	ln(coût moyen de l'énergie) x Petite (0/1)	ln(coût moyen de l'énergie) x Grande (0/1)
IPEPF	0,583*** (0,027)	0,567*** (0,028)	-0,075*** (0,016)	-0,115*** (0,012)
IPEPF x Petite (0/1)		-0,019 (0,021)	0,904*** (0,018)	0,000 (0,002)
IPEPF x Grande (0/1)		0,083*** (0,013)	0,003* (0,002)	0,986*** (0,010)
Âge de l'entreprise en années	0,000 (0,002)	-0,001 (0,002)	0,000 (0,001)	-0,001 (0,001)
SEQE (0/1)	0,052*** (0,012)	0,042*** (0,012)	0,005 (0,004)	0,020*** (0,007)
Effets fixes au niveau de l'entreprise	X	X	X	X
Effets fixes annuels par branche	X	X	X	X
Observations	45 903	45 903	45 903	45 903
Nombre d'entreprises	8 002	8 002	8 002	8 002
Statistique F	173	100	427	1 776

*Note* : Erreurs types robustes clusterisées au niveau des entreprises indiquées entre parenthèses

\* p < 0,10 ; \*\* p < 0,05 ; \*\*\* p < 0,01.

<sup>58</sup> La statistique de Kleibergen Paap est une variante de la statistique F de première étape robuste à l'hétérosécédasticité.

## Annexe C. Tests de robustesse

### Résultats obtenus selon la méthode des moindres carrés ordinaires

Tableau C.1. Estimations MCO des performances économique et environnementale

	Performance environnementale				Performance économique		
	Consommation d'énergie	Consommation d'électricité	Consommation de combustibles fossiles	Émissions de CO <sub>2</sub>	Effectif	Production réelle	Investissement
ln(coût moyen de l'énergie)	-0,223*** (0,025)	-0,091*** (0,020)	-0,365*** (0,044)	-0,343*** (0,035)	-0,037*** (0,008)	-0,042*** (0,009)	-0,080** (0,036)
Âge de l'entreprise en années	-0,030*** (0,007)	-0,038*** (0,007)	-0,013 (0,009)	-0,023*** (0,007)	-0,032*** (0,004)	-0,033*** (0,004)	0,004 (0,013)
SEQE (0/1)	-0,011 (0,037)	-0,043 (0,035)	0,06 (0,061)	0,016 (0,044)	0,045* (0,026)	0,072** (0,028)	0,006 (0,071)
Effets fixes au niveau de l'entreprise	X	X	X	X	X	X	X
Effets fixes annuels par branche	X	X	X	X	X	X	X
Observations	45 903	45 893	40 788	45 903	45 903	45 903	36 327
Nombre d'entreprises	8 002	7 999	7 048	8 002	8 002	8 002	7 168

Note : Erreurs types robustes clusterisées au niveau des entreprises indiquées entre parenthèses. \* p < 0,10 ; \*\* p < 0,05 ; \*\*\* p < 0,01. Toutes les variables dépendantes sont exprimées sous forme logarithmique. Toutes les colonnes sont estimées selon la méthode des MCO. Le coût moyen de l'énergie est égal au logarithme du rapport entre les dépenses d'énergie et la consommation d'énergie. Les variables explicatives sont retardées d'une période. La consommation d'énergie est la somme des consommations d'électricité, de gaz naturel, de fioul domestique et de butane-propane. Les émissions de CO<sub>2</sub> prises en compte sont celles de la consommation d'énergie.

**Tableau C.2. Estimations MCO de l'intensité énergétique et de la substitution des facteurs**

	Intensité énergétique réelle	Consommation d'énergie	Consommation d'énergie par unité d'intrant physique	Consommation d'énergie par unité de capital	Électricité / Combustibles fossiles
In(coût moyen de l'énergie)	-0,181*** (0,024)	-0,185*** (0,023)	-0,206*** (0,028)	-0,186*** (0,024)	0,279*** (0,044)
Âge de l'entreprise en années	0,003 (0,006)	0,003 (0,007)	0,000 (0,008)	0,001 (0,007)	-0,016* (0,009)
SEQE (0/1)	-0,084** (0,036)	-0,057* (0,034)	-0,106*** (0,039)	-0,051 (0,042)	-0,096* (0,054)
Effets fixes au niveau de l'entreprise	X	X	X	X	X
Effets fixes annuels par branche	X	X	X	X	X
Observations	45 903	45 903	45 903	45 903	40 778
Nombre d'entreprises	8 002	8 002	8 002	8 002	7 045

Note : Erreurs types robustes clusterisées au niveau des entreprises indiquées entre parenthèses. \* p < 0,10 ; \*\* p < 0,05 ; \*\*\* p < 0,01. Toutes les variables dépendantes sont exprimées sous forme logarithmique. Toutes les colonnes sont estimées selon la méthode des MCO. Le coût moyen de l'énergie est égal au logarithme du rapport entre les dépenses d'énergie et la consommation d'énergie. Les variables explicatives sont retardées d'une période. La consommation d'énergie est la somme des consommations d'électricité, de gaz naturel, de fioul domestique et de butane-propane. Les émissions de CO<sub>2</sub> prises en compte sont celles de la consommation d'énergie.

## Étude des hétérogénéités dues aux différences de taille des entreprises

Tableau C.3. Effets hétérogènes sur la performance environnementale et sur la performance économique

	Consommation d'énergie	Consommation d'électricité	Consommation de combustibles fossiles	Émissions de CO <sub>2</sub>	Effectif	Production réelle	Investissement
In(coût moyen de l'énergie)	-0,721*** (0,118)	-0,374*** (0,117)	-0,840*** (0,180)	-0,989*** (0,156)	-0,455*** (0,066)	-0,189** (0,075)	-0,933*** (0,289)
In(coût moyen de l'énergie) x PME (0/1)	0,268*** (0,049)	0,338*** (0,052)	0,210*** (0,064)	0,224*** (0,056)	0,338*** (0,036)	0,206*** (0,043)	0,375*** (0,101)
Âge de l'entreprise en années	-0,030*** (0,007)	-0,036*** (0,008)	-0,019** (0,008)	-0,026*** (0,008)	-0,034*** (0,004)	-0,033*** (0,004)	-0,002 (0,014)
SEQE (0/1)	0,045 (0,036)	0,001 (0,034)	0,112* (0,058)	0,081* (0,042)	0,091*** (0,024)	0,097*** (0,028)	0,108 (0,079)
Effets fixes au niveau de l'entreprise	X	X	X	X	X	X	X
Effets fixes annuels par branche	X	X	X	X	X	X	X
Observations	45 893	45 883	40 778	45 893	45 893	45 893	36 317
Nombre d'entreprises	8 000	7 997	7 046	8 000	8 000	8 000	7 166
Statistique KP LM	285	284	243	285	285	285	230

Note : Erreurs types robustes clusterisées au niveau des entreprises indiquées entre parenthèses. \* p < 0,10 ; \*\* p < 0,05 ; \*\*\* p < 0,01. Toutes les variables dépendantes sont exprimées sous forme logarithmique. Toutes les colonnes sont estimées selon la méthode des doubles moindres carrés. Le coût moyen de l'énergie est égal au logarithme du rapport entre les dépenses d'énergie et la consommation d'énergie. La variable binaire « PME » est égale à 1 quand l'entreprise employait moins de 250 personnes avant la période étudiée. Les variables instrumentales du coût moyen de l'énergie et des termes d'interaction sont l'indice des prix de l'énergie à pondération fixe (IPEPF) et l'IPEPF combiné avec la variable binaire « PME ». Les régressions de la première étape sont disponibles sur demande. Les variables explicatives sont retardées d'une période. La consommation d'énergie est la somme des consommations d'électricité, de gaz naturel, de fioul domestique et de butane-propane. Les émissions de CO<sub>2</sub> prises en compte sont celles de la consommation d'énergie.

## Effets contemporains de la variation des prix de l'énergie

Tableau C.4. Résultats sur les performances économique et environnementale quand les variables explicatives ne sont pas retardées

	Performance environnementale				Performance économique		
	Consommation d'énergie	Consommation d'électricité	Consommation de combustibles fossiles	Émissions de CO <sub>2</sub>	Effectif	Production réelle	Investissement
In(coût moyen de l'énergie)	-0,941*** (0,084)	-0,088 (0,090)	-1,326*** (0,143)	-1,754*** (0,105)	-0,171*** (0,051)	-0,113** (0,053)	0,002 (0,179)
Âge de l'entreprise en années	-0,031*** (0,006)	-0,039*** (0,006)	-0,015* (0,008)	-0,020*** (0,006)	-0,030*** (0,004)	-0,032*** (0,004)	-0,013 (0,010)
SEQE (0/1)	-0,012 (0,037)	-0,055 (0,037)	0,029 (0,052)	0,046 (0,042)	0,063** (0,028)	0,069** (0,029)	0,005 (0,067)
Effets fixes au niveau de l'entreprise	X	X	X	X	X	X	X
Effets fixes annuels par branche	X	X	X	X	X	X	X
Observations	66 742	66 719	57 183	66 742	66 742	66 742	54 464
Nombre d'entreprises	11 214	11 211	9 569	11 214	11 214	11 214	10 366
Statistique KP LM	651	653	461	651	651	651	601

Note : Erreurs types robustes clusterisées au niveau des entreprises indiquées entre parenthèses. \* p < 0,10 ; \*\* p < 0,05 ; \*\*\* p < 0,01. Toutes les variables dépendantes sont exprimées sous forme logarithmique. Toutes les colonnes sont estimées selon la méthode des doubles moindres carrés. Le coût moyen de l'énergie est égal au logarithme du rapport entre les dépenses d'énergie et la consommation d'énergie. La variable instrumentale du coût moyen de l'énergie est l'indice des prix de l'énergie à pondération fixe (IPEPF). Les régressions de la première étape sont disponibles sur demande. Les variables explicatives ne sont pas retardées. La consommation d'énergie est la somme des consommations d'électricité, de gaz naturel, de fioul domestique et de butane-propane. Les émissions de CO<sub>2</sub> prises en compte sont celles de la consommation d'énergie.

**Tableau C.5. Résultats sur l'intensité énergétique et la substitution des facteurs quand les variables explicatives ne sont pas retardées**

	Intensité énergétique réelle	Consommation d'énergie par employé	Consommation d'énergie par unité d'intrant physique	Consommation d'énergie par unité de capital	Électricité / Combustibles fossiles
ln(coût moyen de l'énergie)	-0,827*** (0,086)	-0,769*** (0,084)	-0,803*** (0,110)	-0,895*** (0,094)	1,509*** (0,154)
Âge de l'entreprise en années	0,002 (0,005)	-0,001 (0,006)	0,000 (0,007)	0,007 (0,006)	-0,017** (0,008)
SEQE (0/1)	-0,080** (0,036)	-0,074** (0,035)	-0,110*** (0,037)	-0,052 (0,044)	-0,096** (0,045)
Effets fixes au niveau de l'entreprise	X	X	X	X	X
Effets fixes annuels par branche	X	X	X	X	X
Observations	66 742	66 742	66 742	66 742	57 162
Nombre d'entreprises	11 214	11 214	11 214	11 214	9 566
Statistique KP LM	651	651	651	651	461

*Note :* Erreurs types robustes clusterisées au niveau des entreprises indiquées entre parenthèses. \* p < 0,10 ; \*\* p < 0,05 ; \*\*\* p < 0,01. Toutes les variables dépendantes sont exprimées sous forme logarithmique. Toutes les colonnes sont estimées selon la méthode des doubles moindres carrés. Le coût moyen de l'énergie est égal au logarithme du rapport entre les dépenses d'énergie et la consommation d'énergie. La variable instrumentale du coût moyen de l'énergie est l'indice des prix de l'énergie à pondération fixe (IPEPF). Les régressions de la première étape sont disponibles sur demande. Les variables explicatives ne sont pas retardées. La consommation d'énergie est la somme des consommations d'électricité, de gaz naturel, de fioul domestique et de butane-propane. Les émissions de CO<sub>2</sub> prises en compte sont celles de la consommation d'énergie.

## Analyse de sensibilité liée à la fusion des données au niveau des entreprises avec les données au niveau des établissements

Tableau C.6. Effet des prix de l'énergie sur les performances environnementale et économique quand le seuil retenu pour l'emploi est 100 %

	Performance environnementale				Performance économique		
	Consommation d'énergie	Consommation d'électricité	Consommation de combustibles fossiles	Émissions de CO <sub>2</sub>	Effectif	Production réelle	Investissement
In(coût moyen de l'énergie)	-0,655*** (0,114)	-0,187* (0,113)	-0,796*** (0,180)	-1,006*** (0,148)	-0,208*** (0,069)	-0,121 (0,081)	-0,634** (0,278)
Âge de l'entreprise en années	-0,029*** (0,008)	-0,041*** (0,008)	0,002 (0,011)	-0,018** (0,008)	-0,033*** (0,006)	-0,031*** (0,005)	-0,007 (0,016)
SEQE (0/1)	0,061 (0,043)	-0,015 (0,041)	0,163** (0,072)	0,113** (0,050)	0,073*** (0,028)	0,090*** (0,032)	0,035 (0,093)
Effets fixes au niveau de l'entreprise	X	X	X	X	X	X	X
Effets fixes annuels par branche	X	X	X	X	X	X	X
Observations	40 084	40 075	35 256	40 084	40 084	40 084	31 594
Nombre d'entreprises	7 364	7 361	6 441	7 364	7 364	7 364	6 553
Statistique KP LM	324	323	279	324	324	324	251

Note : Erreurs types robustes clusterisées au niveau des entreprises indiquées entre parenthèses. \* p < 0,10 ; \*\* p < 0,05 ; \*\*\* p < 0,01. Toutes les variables dépendantes sont exprimées sous forme logarithmique. Toutes les colonnes sont estimées selon la méthode des doubles moindres carrés. Le coût moyen de l'énergie est égal au logarithme du rapport entre les dépenses d'énergie et la consommation d'énergie. La variable instrumentale du coût moyen de l'énergie est l'indice des prix de l'énergie à pondération fixe (IPEPF). Les régressions de la première étape sont disponibles sur demande. Les variables explicatives sont retardées d'une période. La consommation d'énergie est la somme des consommations d'électricité, de gaz naturel, de fioul domestique et de butane-propane. Les émissions de CO<sub>2</sub> prises en compte sont celles de la consommation d'énergie.

Tableau C.7. Effet des prix de l'énergie sur les performances environnementale et économique quand le seuil retenu pour l'emploi est 85 %

	Performance environnementale				Performance économique		
	Consommation d'énergie	Consommation d'électricité	Consommation de combustibles fossiles	Émissions de CO <sub>2</sub>	Effectif	Production réelle	Investissement
In(coût moyen de l'énergie)	-0,584*** (0,108)	-0,161 (0,105)	-0,618*** (0,165)	-0,896*** (0,139)	-0,217*** (0,063)	-0,045 (0,072)	-0,322 (0,249)
Âge de l'entreprise en années	-0,032*** (0,006)	-0,038*** (0,006)	-0,017** (0,008)	-0,026*** (0,007)	-0,033*** (0,004)	-0,032*** (0,004)	0,002 (0,012)
SEQE (0/1)	0,026 (0,036)	-0,025 (0,035)	0,087 (0,058)	0,070* (0,041)	0,075*** (0,026)	0,079*** (0,028)	0,037 (0,072)
Effets fixes au niveau de l'entreprise	X	X	X	X	X	X	X
Effets fixes annuels par branche	X	X	X	X	X	X	X
Observations	47 509	47 499	42 216	47 509	47 509	47 509	37 612
Nombre d'entreprises	8 206	8 203	7 223	8 206	8 206	8 206	7 361
Statistique KP LM	417	416	358	417	417	417	327

Note : Erreurs types robustes clusterisées au niveau des entreprises indiquées entre parenthèses. \* p < 0,10 ; \*\* p < 0,05 ; \*\*\* p < 0,01. Toutes les variables dépendantes sont exprimées sous forme logarithmique. Toutes les colonnes sont estimées selon la méthode des doubles moindres carrés. Le coût moyen de l'énergie est égal au logarithme du rapport entre les dépenses d'énergie et la consommation d'énergie. La variable instrumentale du coût moyen de l'énergie est l'indice des prix de l'énergie à pondération fixe (IPEPF). Les régressions de la première étape sont disponibles sur demande. Les variables explicatives sont retardées d'une période. La consommation d'énergie est la somme des consommations d'électricité, de gaz naturel, de fioul domestique et de butane-propane. Les émissions de CO<sub>2</sub> prises en compte sont celles de la consommation d'énergie.

## Effets dynamiques de la variation des prix de l'énergie

**Tableau C.8. Effets dynamiques des prix de l'énergie sur les performances environnementale et économique**

	Performance environnementale				Performance économique		
	Consommation d'énergie	Consommation d'électricité	Consommation de combustibles fossiles	Émissions de CO <sub>2</sub>	Effectif	Production réelle	Investissement
In(coût moyen de l'énergie) t	0,005 (0,166)	-0,03 (0,149)	-0,29 (0,241)	-0,059 (0,219)	-0,069 (0,067)	0,002 (0,091)	0,088 (0,466)
In(coût moyen de l'énergie) t-1	-0,112 (0,182)	-0,123 (0,154)	0,029 (0,244)	-0,111 (0,241)	-0,033 (0,063)	0,205** (0,084)	0,011 (0,510)
In(coût moyen de l'énergie) t-2	-0,472*** (0,155)	-0,017 (0,144)	-0,578** (0,229)	-0,752*** (0,199)	-0,164** (0,078)	-0,249*** (0,096)	-0,321 (0,423)
Âge de l'entreprise en années t	-0,020** (0,008)	-0,022*** (0,006)	-0,018 (0,011)	-0,014 (0,010)	-0,016*** (0,005)	-0,024*** (0,004)	-0,031** (0,016)
Âge de l'entreprise en années t-1	-0,008 (0,006)	-0,015** (0,007)	0,003 (0,009)	-0,005 (0,007)	-0,015*** (0,004)	-0,007** (0,004)	0,027 (0,018)
Âge de l'entreprise en années t-2	-0,016** (0,007)	-0,020*** (0,007)	-0,009 (0,008)	-0,014* (0,008)	-0,010*** (0,004)	-0,012*** (0,004)	0,007 (0,016)
SEQE t	-0,046 (0,049)	0,003 (0,044)	-0,071 (0,063)	-0,064 (0,054)	0,034 (0,029)	0,025 (0,022)	-0,014 (0,129)
SEQE t-1	0,083** (0,042)	0,029 (0,038)	0,167*** (0,054)	0,121** (0,047)	0,029 (0,030)	0,034* (0,018)	0,047 (0,123)
SEQE t-2	-0,013 (0,065)	-0,079 (0,057)	0,013 (0,079)	0,015 (0,070)	0,02 (0,026)	0,036 (0,027)	-0,006 (0,090)
Effets fixes au niveau de l'entreprise	X	X	X	X	X	X	X
Effets fixes annuels par branche	X	X	X	X	X	X	X
Observations	33 980	33 976	30 838	33 980	33 980	33 980	26 325
Nombre d'entreprises	6 206	6 205	5 603	6 206	6 206	6 206	5 491
Statistique KP LM	73	73	68	73	73	73	64
Effet à long terme	-0,578*** (0,171)	-0,170 (0,163)	-0,840*** (0,261)	-0,922*** (0,213)	-0,266** (0,103)	-0,042 (0,124)	-0,222 (0,451)

Note : Erreurs types robustes clusterisées au niveau des entreprises indiquées entre parenthèses. \* p < 0,10 ; \*\* p < 0,05 ; \*\*\* p < 0,01. Toutes les variables dépendantes sont exprimées sous forme logarithmique. Toutes les colonnes sont estimées selon la méthode des doubles moindres carrés. Le coût moyen de l'énergie est égal au logarithme du rapport entre les dépenses d'énergie et la consommation d'énergie. La variable instrumentale du coût moyen de l'énergie est l'indice des prix de l'énergie à pondération fixe (IPEPF). Les régressions de la première étape sont indiquées dans le tableau C.10. La consommation d'énergie est la somme des consommations d'électricité, de gaz naturel, de fioul domestique et de butane-propane. Les émissions de CO<sub>2</sub> prises en compte sont celles de la consommation d'énergie. L'effet à long terme est la somme des coefficients du logarithme du coût moyen de l'énergie.

**Tableau C.9. Effets dynamiques des prix de l'énergie sur la substitution des facteurs**

	Intensité énergétique réelle	Consommation d'énergie par employé	Consommation d'énergie par unité d'intrant physique	Consommation d'énergie par unité de capital	Électricité / Combustibles fossiles
ln(coût moyen de l'énergie) t	0,003 (0,154)	0,074 (0,158)	0,131 (0,191)	-0,166 (0,166)	0,236 (0,254)
ln(coût moyen de l'énergie) t-1	-0,317* (0,184)	-0,079 (0,188)	-0,168 (0,222)	-0,167 (0,189)	-0,1 (0,254)
ln(coût moyen de l'énergie) t-2	-0,223 (0,152)	-0,308** (0,151)	-0,345* (0,183)	-0,247 (0,165)	0,623*** (0,232)
Âge de l'entreprise en années t	0,005 (0,007)	-0,004 (0,008)	0,003 (0,008)	0,008 (0,008)	-0,007 (0,011)
Âge de l'entreprise en années t-1	0,000 (0,007)	0,007 (0,007)	-0,002 (0,008)	-0,008 (0,007)	-0,008 (0,008)
Âge de l'entreprise en années t-2	-0,005 (0,007)	-0,006 (0,007)	-0,005 (0,009)	-0,006 (0,008)	-0,012* (0,007)
SEQE t	-0,07 (0,051)	-0,08 (0,056)	-0,102* (0,054)	-0,049 (0,051)	0,07 (0,044)
SEQE t-1	0,049 (0,044)	0,053 (0,047)	0,065 (0,050)	0,099** (0,046)	-0,135*** (0,036)
SEQE t-2	-0,05 (0,060)	-0,033 (0,056)	-0,077 (0,072)	-0,093 (0,060)	-0,093* (0,050)
Effets fixes au niveau de l'entreprise	X	X	X	X	X
Effets fixes annuels par branche	X	X	X	X	X
Observations	33 980	33 980	33 980	33 980	30 834
Nombre d'entreprises	6 206	6 206	6 206	6 206	5 602
Statistique KP LM	73	73	73	73	68
Effet à long terme	-0,537*** (0,167)	-0,313* (0,164)	-0,382* (0,220)	-0,580*** (0,183)	0,759*** (0,257)

Note : Erreurs types robustes clusterisées au niveau des entreprises indiquées entre parenthèses. \* p < 0,10 ; \*\* p < 0,05 ; \*\*\* p < 0,01. Toutes les variables dépendantes sont exprimées sous forme logarithmique. Toutes les colonnes sont estimées selon la méthode des doubles moindres carrés. Le coût moyen de l'énergie est égal au logarithme du rapport entre les dépenses d'énergie et la consommation d'énergie. La variable instrumentale du coût moyen de l'énergie est l'indice des prix de l'énergie à pondération fixe (IPEPF). Les régressions de la première étape sont indiquées dans le tableau C.10. La consommation d'énergie est la somme des consommations d'électricité, de gaz naturel, de fioul domestique et de butane-propane. Les émissions de CO<sub>2</sub> prises en compte sont celles de la consommation d'énergie. L'effet à long terme est la somme des coefficients du logarithme du coût moyen de l'énergie.

**Tableau C.10. Régressions de la première étape pour les effets dynamiques**

	Ln(coût moyen) t	Ln(coût moyen) t-1	Ln(coût moyen) t-2
IPEPF t	0,449*** (0,030)	0,151*** (0,032)	0,161*** (0,036)
IPEPF t-1	0,049 (0,031)	0,448*** (0,036)	0,148*** (0,035)
IPEPF t-2	0,021 (0,029)	0,033 (0,030)	0,546*** (0,036)
Âge de l'entreprise en années t	-0,005* (0,002)	0,000 (0,003)	-0,001 (0,004)
Âge de l'entreprise en années t-1	0,001 (0,003)	0,000 (0,003)	0,000 (0,004)
Âge de l'entreprise en années t-2	0,0000 (0,003)	-0,001 (0,002)	-0,004 (0,004)
SEQE t	0,024 (0,019)	-0,009 (0,015)	-0,022 (0,015)
SEQE t-1	0,018 (0,019)	0,037* (0,019)	0,012 (0,014)
SEQE t-2	0,007 (0,015)	0,049** (0,021)	0,085*** (0,018)
Effets fixes au niveau de l'entreprise	X	X	X
Effets fixes annuels par branche	X	X	X
Observations	36 424	26 720	25 855
Nombre d'entreprises	6 841	5 316	5 153
Statistique F	29	30	45

*Note* : Erreurs types robustes clusterisées au niveau des entreprises indiquées entre parenthèses.

\* p < 0,10 ; \*\* p < 0,05 ; \*\*\* p < 0,01.

## La taille et l'intensité énergétique initiales de l'entreprise ont toutes deux une influence sur l'effet du prix de l'énergie

Tableau C.11. Effets hétérogènes sur la performance environnementale et sur la performance économique

	Consommation d'énergie	Consommation d'électricité	Consommation de combustibles fossiles	Émissions de CO <sub>2</sub>	Effectif	Production réelle	Investissement
ln(coût moyen de l'énergie)	-1,146*** (0,113)	-0,732*** (0,111)	-1,084*** (0,166)	-1,406*** (0,140)	-0,782*** (0,073)	-0,573*** (0,083)	-0,914*** (0,243)
ln(coût moyen de l'énergie) x PME (0/1)	0,311*** (0,048)	0,372*** (0,050)	0,278*** (0,064)	0,265*** (0,053)	0,381*** (0,037)	0,222*** (0,043)	0,421*** (0,093)
ln(coût moyen de l'énergie) x consommation d'énergie/employé	-0,159*** (0,024)	-0,154*** (0,024)	-0,117*** (0,032)	-0,143*** (0,030)	-0,135*** (0,016)	-0,165*** (0,018)	-0,117** (0,047)
Âge de l'entreprise en années	-0,027*** (0,007)	-0,035*** (0,007)	-0,012 (0,009)	-0,021*** (0,007)	-0,030*** (0,004)	-0,030*** (0,004)	0,006 (0,013)
SEQE (0/1)	0,117*** (0,038)	0,064* (0,037)	0,156** (0,061)	0,150*** (0,044)	0,157*** (0,027)	0,165*** (0,031)	0,127* (0,075)
Effets fixes au niveau de l'entreprise	X	X	X	X	X	X	X
Effets fixes annuels par branche	X	X	X	X	X	X	X
Observations	45 903	45 893	40 788	45 903	45 903	45 903	36 327
Nombre d'entreprises	8 002	7 999	7 048	8 002	8 002	8 002	7 168
Statistique KP LM	345	344	298	345	345	345	262

*Note* : Erreurs types robustes clusterisées au niveau des entreprises indiquées entre parenthèses. \*  $p < 0,10$  ; \*\*  $p < 0,05$  ; \*\*\*  $p < 0,01$ . Toutes les variables dépendantes sont exprimées sous forme logarithmique. Toutes les colonnes sont estimées selon la méthode des doubles moindres carrés. Le coût moyen de l'énergie est égal au logarithme du rapport entre les dépenses d'énergie et la consommation d'énergie. La variable binaire « PME » est égale à 1 quand l'entreprise employait moins de 250 personnes avant la période étudiée. La consommation d'énergie par employé est exprimée sous forme logarithmique et, pour éviter les problèmes d'endogénéité, sa valeur est celle d'avant la période étudiée. Les variables instrumentales du coût moyen de l'énergie et des termes d'interaction sont l'indice des prix de l'énergie à pondération fixe (IPEPF), l'IPEPF combiné avec la variable binaire « PME », et l'IPEPF combiné avec la consommation d'énergie par employé. Les régressions de la première étape sont indiquées dans le tableau B.1. Les variables explicatives sont retardées d'une période. La consommation d'énergie est la somme des consommations d'électricité, de gaz naturel, de fioul domestique et de butane-propane. Les émissions de CO<sub>2</sub> prises en compte sont celles de la consommation d'énergie.

Tableau C.12. Effets hétérogènes sur l'intensité énergétique et la substitution des facteurs

	Intensité énergétique réelle	Consommation d'énergie par employé	Consommation d'énergie par unité d'intrant physique	Consommation d'énergie par unité de capital	Électricité / Combustibles fossiles
In(coût moyen de l'énergie)	-0,573*** (0,110)	-0,364*** (0,107)	-0,604*** (0,148)	-0,470*** (0,126)	0,488*** (0,159)
In(coût moyen de l'énergie) x PME (0/1)	0,089* (0,047)	-0,071* (0,042)	0,076 (0,063)	0,029 (0,055)	0,093 (0,059)
In(coût moyen de l'énergie) x consommation d'énergie/employé	0,005 (0,023)	-0,025 (0,022)	-0,062** (0,031)	0,047* (0,028)	-0,042 (0,030)
Âge de l'entreprise en années	0,003 (0,006)	0,003 (0,007)	0,001 (0,008)	0,000 (0,007)	-0,015* (0,008)
SEQE (0/1)	-0,048 (0,037)	-0,039 (0,035)	-0,055 (0,042)	-0,038 (0,042)	-0,097* (0,054)
Effets fixes au niveau de l'entreprise	X	X	X	X	X
Effets fixes annuels par branche	X	X	X	X	X
Observations	45 903	45 903	45 903	45 903	40 778
Nombre d'entreprises	8 002	8 002	8 002	8 002	7 045
Statistique KP LM	345	345	345	345	297

Note : Erreurs types robustes clusterisées au niveau des entreprises indiquées entre parenthèses. \*  $p < 0,10$  ; \*\*  $p < 0,05$  ; \*\*\*  $p < 0,01$ . Toutes les variables dépendantes sont exprimées sous forme logarithmique. Toutes les colonnes sont estimées selon la méthode des doubles moindres carrés. Le coût moyen de l'énergie est égal au logarithme du rapport entre les dépenses d'énergie et la consommation d'énergie. La variable binaire « PME » est égale à 1 quand l'entreprise employait moins de 250 personnes avant la période étudiée. La consommation d'énergie par employé est exprimée sous forme logarithmique et, pour éviter les problèmes d'endogénéité, sa valeur est celle d'avant la période étudiée. Les variables instrumentales du coût moyen de l'énergie et des termes d'interaction sont l'indice des prix de l'énergie à pondération fixe (IPEPF), l'IPEPF combiné avec la variable binaire « PME », et l'IPEPF combiné avec la consommation d'énergie par employé. Les régressions de la première étape sont indiquées dans le tableau B.1. Les variables explicatives sont retardées d'une période. La consommation d'énergie est la somme des consommations d'électricité, de gaz naturel, de fioul domestique et de butane-propane. Les émissions de CO<sub>2</sub> prises en compte sont celles de la consommation d'énergie.

## Régressions pondérées

Tableau C.13. Estimations DMC pondérées des performances économique et environnementale

	Performance environnementale				Performance économique		
	Consommation d'énergie	Consommation d'électricité	Consommation de combustibles fossiles	Émissions de CO <sub>2</sub>	Effectif	Production réelle	Investissement
ln(coût moyen de l'énergie)	-0,503*** (0,121)	-0,099 (0,117)	-0,662*** (0,185)	-0,807*** (0,165)	-0,181*** (0,066)	-0,022 (0,072)	-0,624** (0,308)
Âge de l'entreprise en années	-0,030*** (0,007)	-0,036*** (0,008)	-0,019** (0,008)	-0,026*** (0,008)	-0,034*** (0,004)	-0,033*** (0,004)	-0,001 (0,014)
SEQE (0/1)	0,014 (0,036)	-0,039 (0,035)	0,087 (0,058)	0,055 (0,043)	0,051** (0,024)	0,073*** (0,028)	0,063 (0,079)
Effets fixes au niveau de l'entreprise	X	X	X	X	X	X	X
Effets fixes annuels par branche	X	X	X	X	X	X	X
Observations	45 893	45 883	40 778	45 893	45 893	45 893	36 317
Nombre d'entreprises	8 000	7 997	7 046	8 000	8 000	8 000	7 166

Note : Erreurs types robustes clusterisées au niveau des entreprises indiquées entre parenthèses. \* p < 0,10 ; \*\* p < 0,05 ; \*\*\* p < 0,01. Toutes les variables dépendantes sont exprimées sous forme logarithmique. Toutes les colonnes sont estimées selon la méthode des doubles moindres carrés (DMC). Le coût moyen de l'énergie est égal au logarithme du rapport entre les dépenses d'énergie et la consommation d'énergie. La variable instrumentale du coût moyen de l'énergie est l'indice des prix de l'énergie à pondération fixe (IPEPF). Les variables explicatives sont retardées d'une période. La consommation d'énergie est la somme des consommations d'électricité, de gaz naturel, de fioul domestique et de butane-propane. Les émissions de CO<sub>2</sub> prises en compte sont celles de la consommation d'énergie.

Tableau C.14. Estimations DMC pondérées de l'intensité énergétique et de la substitution des facteurs

	Intensité énergétique réelle	Consommation d'énergie par employé	Consommation d'énergie par unité d'intrant physique	Consommation d'énergie par unité de capital	Électricité / Combustibles fossiles
In(coût moyen de l'énergie)	-0,481*** (0,126)	-0,322** (0,125)	-0,503*** (0,159)	-0,459*** (0,140)	0,649*** (0,205)
Âge de l'entreprise en années	0,003 (0,007)	0,004 (0,007)	0,000 (0,008)	0,002 (0,008)	-0,008 (0,008)
SEQE (0/1)	-0,059 (0,038)	-0,037 (0,035)	-0,072* (0,041)	-0,034 (0,043)	-0,128** (0,052)
Effets fixes au niveau de l'entreprise	X	X	X	X	X
Effets fixes annuels par branche	X	X	X	X	X
Observations	45 893	45 893	45 893	45 893	40 768
Nombre d'entreprises	8 000	8 000	8 000	8 000	7 043

Note : Erreurs types robustes clusterisées au niveau des entreprises indiquées entre parenthèses. \* p < 0,10 ; \*\* p < 0,05 ; \*\*\* p < 0,01. Toutes les variables dépendantes sont exprimées sous forme logarithmique. Toutes les colonnes sont estimées selon la méthode des doubles moindres carrés (DMC). Le coût moyen de l'énergie est égal au logarithme du rapport entre les dépenses d'énergie et la consommation d'énergie. La variable instrumentale du coût moyen de l'énergie est l'indice des prix de l'énergie à pondération fixe (IPEPF). Les variables explicatives sont retardées d'une période. La consommation d'énergie est la somme des consommations d'électricité, de gaz naturel, de fioul domestique et de butane-propane. Les émissions de CO<sub>2</sub> prises en compte sont celles de la consommation d'énergie.