

Les facteurs explicatifs de l'évolution des émissions de CO₂ sur les deux phases de l'EU-ETS : une analyse économétrique

Olivier Gloaguen¹ et Emilie Alberola²

Octobre 2013

Résumé

Il est régulièrement affirmé que le ralentissement économique débuté en 2008 explique largement la baisse des émissions de carbone observée en Europe depuis la mise en place du système européen d'échange de quotas de CO₂(EU ETS). La Commission européenne l'établit d'ailleurs très clairement dans son premier rapport sur l'état de fonctionnement de l'EU ETS de novembre 2012. A l'aide d'une analyse économétrique par rapport à un scénario de référence proposé, il est montré qu'entre 2005 et 2011, quelques 1,1 GtCO₂ de réductions auraient été évitées dans le périmètre des 11 000 installations couvertes par l'EU ETS : environ 500 Mt des réductions d'émissions de CO₂ résulteraient du développement des énergies renouvelables et entre 100 et 200 Mt de l'amélioration de l'intensité énergétique de l'économie. Ces développements sont notamment influencés par les politiques du paquet énergie-climat de 2020 pour l'atteinte des objectifs de 20 % d'énergie renouvelable et de 20 % d'amélioration de l'efficacité énergétique. La crise économique a joué un rôle significatif mais pas prépondérant dans la baisse des émissions de CO₂, rôle estimé à 300 Mt. Des effets de substitution par le prix entre le charbon et le gaz semblent avoir également affecté les émissions, pour environ 200 Mt. L'étude ne permet pas de déceler un impact du prix du carbone. Il est cependant important de souligner que la crise économique et le déploiement des énergies renouvelables sont à l'origine de la baisse de ce prix du CO₂, rendant justement son influence marginale pour des réductions d'émissions de CO₂ dans les installations couvertes au sein de l'UE.

Mots-clés : European Union Emissions Trading Scheme (EU ETS), économétrie de panel

¹ Olivier Gloaguen, Chargé d'étude à CDC Climat Recherche jusqu'en juillet 2013.

² Emilie Alberola, Chef de pôle de recherche à CDC Climat Recherche : emilie.alberola@cdcclimat.com

Les auteurs remercient pour leurs précieuses relectures et suggestions d'amélioration de l'étude : Oliver Sartor, doctorant à CDC Climat Recherche ; Benoît Chèze, chargé de recherche à l'IFPEN et chercheur associé à EconomiX et à la Chaire Economie du Climat ; Maria Mansanet-Bataller, Maître de Conférence à l'Université de Franche-Comté ; Richard Baron, Principal Advisor, Round Table on Sustainable Development, OECD et Anna Creti, Professeur CGEMP Université Paris Dauphine.

Ce document de travail constitue une version préliminaire et fait actuellement l'objet d'une révision qui intègre les limites de l'analyse économétrique et améliore le choix des variables.

Table des matières

1. Introduction	5
2. Revue de littérature	7
3. Description des variables et cadre de l'analyse	9
3.1 Les émissions de carbone, la variable expliquée	10
3.2 Le périmètre géographique de l'étude	16
4. Méthodologie et tests de robustesse	17
5. Modèles, résultats et analyses	18
6. Modèle contrefactuel et estimation des impacts de chaque variable	22
6.1 Le scénario contrefactuel dit « au fil de l'eau » (AFE)	24
6.2 Abattements estimés par rapport au scénario de référence AFE	26
6.3 Origine de la baisse des émissions	27
6.4 Remarques et limitations sur les résultats	28
Conclusion	29
Bibliographie	31
Annexes	33

Directeur de publication : Benoît Leguet - ISSN 2101-4663

**Pour recevoir des actualités sur nos publications, envoyez vos coordonnées à research@cdcclimat.com
Contact presse : Maria Scolan - 01 58 50 32 48 - maria.scolan@cdcclimat.com**

Cette publication est intégralement financée par l'établissement public « Caisse des Dépôts ». CDC Climat ne participe pas au financement de ces travaux.

La Caisse des Dépôts n'est en aucun cas responsable de la teneur de cette publication.

Cette publication ne constitue pas une analyse financière au sens de la réglementation.

La diffusion de ce document ne constitue ni (i) la fourniture d'un conseil de quelque nature que ce soit, ni (ii) la prestation d'un service d'investissement ni (iii) une offre visant à la réalisation d'un quelconque investissement.

Les marchés et actifs objets des analyses contenues dans ce document présentent des risques spécifiques. Les destinataires de ce document sont invités à requérir les conseils (notamment financiers, juridiques et/ou fiscaux) utiles avant toute décision d'investissement sur lesdits marchés.

Les travaux objets de la présente publication ont été réalisés à titre indépendant par l'équipe de CDC Climat Recherche. Des mesures organisationnelles en place au sein de CDC Climat renforcent l'indépendance matérielle de cette équipe. Cette publication reflète donc les seules opinions de l'équipe CDC Climat Recherche, à l'exclusion des équipes opérationnelles ou filiales de CDC Climat.

Les conclusions de ces travaux ne lient d'aucune manière l'action des équipes opérationnelles ou filiales de CDC Climat. CDC Climat n'est pas un prestataire de services d'investissement.

1. Introduction

La deuxième phase du système européen d'échange de quotas d'émissions de carbone (*European Union Emissions Trading Scheme*, EU-ETS) qui s'est déroulée sur la période de 2008 à 2012, s'achève. Mis en place en 2005, ce système a pour objectif de réduire les émissions de CO₂ en Europe en établissant des plafonds d'émission à plus de 11 000 installations³ qui sont contraintes de restituer pour chaque conformité annuelle un montant de quotas correspondant à leurs émissions de CO₂ vérifiées. L'EU ETS s'applique dans 31 pays⁴ et couvre plus de 45 % de leurs émissions totales de gaz à effet de serre (GES).

La première période a constitué une phase d'apprentissage: environ 2,3 milliards de quotas ont été alloués chaque année, presque intégralement de manière gratuite. Les émissions annuelles de CO₂ se sont portées à 2,1 milliards de tonnes, dégageant un surplus annuel moyen de 160 millions de quotas. Ce surplus ne pouvant pas être utilisé en phase 2, le prix du quota de première période est tombé à zéro en 2007. Entre 2005 et 2007, les émissions de CO₂ de l'EU ETS ont globalement augmenté de 2,1 %⁵ au niveau des pays et des secteurs couverts par l'EU-ETS (le PIB européen augmentant lui de 5,8 %). Il faut cependant noter que les émissions totales ont progressé de 1,9 % entre 1990 et 2007 au niveau de l'UE-27⁶, alors qu'elles ont été réduites de 4,7 % au niveau de l'UE-15⁷.

La deuxième période correspond à la phase d'application du protocole de Kyoto, les objectifs de réduction des émissions de CO₂ de l'EU ETS par Etats membres en ligne avec ceux définis dans l'accord. Pour la plupart, les quotas sont toujours alloués gratuitement. Contrairement à la première phase, la possibilité de conserver les quotas de phase 2 en phase 3 a permis au prix de se maintenir, pendant un temps, à un niveau significatif avant de chuter graduellement à moins de 4 € la tonne. Au bilan, entre 2008 et 2012, on observe une baisse totale des émissions de 11,9 % avec une forte baisse de -11,4 % en 2009 par rapport à 2008. Cette deuxième période, 2008-2012, a été marquée par la crise économique de 2009 qui se caractérise par un déclin économique au niveau mondial débutant dès la fin 2007, déclin qui s'est particulièrement aggravé en septembre 2008. Dans ce contexte, il est régulièrement avancé que la crise économique, synonyme de réduction de l'activité industrielle, est à l'origine de la baisse observée des émissions de CO₂. La Commission européenne l'établit d'ailleurs très clairement dans son premier rapport sur l'état de fonctionnement de l'EU ETS de novembre 2012,

³ Les secteurs couverts sont principalement : la production d'énergie (qui représente plus de 60 % des émissions totales concernées par l'EU-ETS), l'ensemble des « autres combustions » qui regroupe des unités servant, typiquement, à produire de la chaleur en support à d'autres activités industrielles ou urbaines. Viennent ensuite, et à peu près au même niveau d'émissions, les cimenteries, les raffineries et les aciéries.

⁴ Les 27 Etats membres, la Croatie, la Norvège, le Liechtenstein et l'Islande.

⁵ Emissions vérifiées issues de la base EUTL, sans inclure la Bulgarie et la Roumanie qui rejoignent l'EU-ETS en 2007

⁶ US Energy Information Administration, émissions totales liées à la consommation d'énergie.
www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=90&pid=44&aid=8

⁷ Anaïs Delbos et Christian de Perthuis, Les marchés du carbone expliqués (2009), page 13.

dans lequel elle explique que « l'EU-ETS fait face à un défi sous la forme d'un surplus grandissant de quotas, largement⁸ du fait de la crise économique qui a réduit les émissions plus qu'anticipé »⁹. Il est effectivement probable que la réduction de l'activité économique au sein de l'Union européenne a eu un effet sur la baisse des émissions de CO₂, mais peut-on dire que la crise en est la cause principale, voire la seule ? Peut-on alors estimer la contribution imputable à la seule activité économique dans l'évolution des émissions de CO₂ ?

D'autres facteurs pourraient également intervenir et jouer un certain rôle, au premier rang desquels les efforts effectivement réalisés pour décarboner l'économie et accroître la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique. En effet, les engagements pris au niveau européen et qui se traduisent par les objectifs dits des « 3 x 20 »¹⁰, ont été mis en œuvre par une série de directives, dont celle sur la promotion des énergies renouvelables et celle adoptée en 2012 sur l'efficacité énergétique. Ces objectifs dépendent de politiques nationales prévues dans les plans d'action de chaque Etat membre et se sont traduits dans la plupart des États par une « croissance notable des énergies renouvelables »¹¹. Dans ce cas, peut-on estimer dans quelle mesure ces efforts ont contribué à réduire les émissions de CO₂ ? De même, la question se pose de savoir si les évolutions du prix de l'énergie ont impacté les émissions de CO₂, ou encore si le système de quotas, et notamment le « signal prix » du carbone qu'il révèle, a effectivement joué un rôle en favorisant les changements entre les énergies et les technologies moins émettrices de carbone¹².

L'objet de cette étude est d'apporter des éléments de réponse quantitatifs à ces questions, en se basant sur une analyse économétrique des émissions de carbone sur les deux périodes de l'EU-ETS (2005-2011) pour un panel de pays inclus dans l'EU-ETS.

Cette analyse s'attache à relier les émissions de CO₂, la variable expliquée, à une série de variables explicatives dont on pourrait penser qu'elles ont eu un impact sur l'évolution des émissions de CO₂, puis dans un second temps d'infirmer ou d'affirmer l'impact de chacune de ces variables, et enfin d'estimer leurs contributions relatives.

⁸ Capitalisation par l'auteur

⁹ Commission européenne, Climate Action, http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/index_en.htm

¹⁰ La Directive 2009/28/CE sur les énergies renouvelables a établi un cadre européen pour la promotion des énergies renouvelables, fixant des objectifs nationaux contraignants en matière d'énergies renouvelables, afin d'atteindre d'ici à 2020 une part de 20% d'énergies renouvelables dans la consommation énergétique finale, réduire les émissions de CO₂ des pays de l'Union de 20 % et accroître l'efficacité énergétique de 20 % d'ici à 2020.

¹¹ Commission européenne, Rapport sur les progrès accomplis dans le secteur des énergies renouvelables, 2013, page 3. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2013:0175:FIN:FR:HTML>

¹² Comme il le sera précisé plus loin, l'effet du prix du carbone sur les investissements sera capturé de manière indirecte par les variables décrivant l'efficacité énergétique.

La démarche est donc la suivante. Après une revue de littérature destinée à orienter le choix des variables explicatives pouvant être à priori proposées, une analyse économétrique est réalisée afin de proposer et estimer un modèle reliant les émissions et les variables explicatives retenues. La robustesse de ce modèle est également testée. A partir de ce modèle, un scénario contrefactuel est proposé afin de pouvoir estimer les écarts entre les émissions observées entre 2005 et 2012 et ce scénario de référence.

2. L'analyse des facteurs explicatifs des émissions de CO₂ : une nouvelle contribution à la littérature académique

La littérature économique empirique qui s'est développée sur l'EU ETS, s'est jusqu'à présent principalement concentrée sur l'évaluation économétrique des facteurs explicatifs du prix du carbone, moins sur l'évaluation des facteurs des émissions de CO₂. La première période a fait l'objet de plusieurs publications visant à déterminer les principaux facteurs de prix et leurs effets sur d'autres prix énergétiques, parmi lesquels nous pouvons citer Bunn et Fezzi (2007), Mansanet-Bataller et al. (2007), Alberola et al. (2008), et Alberola et Chevallier (2009). En général, ces travaux ont conclu que les prix des quotas ont réagi : (i) à la publication des émissions vérifiées et de décisions réglementaires, (ii) aux prix des énergies primaires, et (iii) aux conditions climatiques.

Ainsi, peu d'études économétriques semblent exister sur l'analyse ex-post des facteurs explicatifs des émissions de CO₂ de l'EU ETS. L'étude se rapprochant le plus du présent travail est celle de Anderson et al. (2009), tandis qu'Ellerman (2010) et McGuinness & Ellerman (2008) proposent plusieurs considérations sur les variables explicatives pouvant être retenues.

En 2009, Anderson, Di Maria et Convery ont étudié les réductions d'émissions de CO₂ et la sur-allocation de quotas durant la phase pilote de l'EU-ETS (2005-2007) à l'aide d'un modèle économétrique dynamique de panel (pays européens). Les auteurs choisissent comme variables explicatives : le niveau de CO₂ à la période précédente, le niveau de l'activité économique dans les secteurs industriels et énergétiques, le coût de l'électricité et des facteurs météorologiques. Du fait de données manquantes pour certains des pays de leur panel, ils ont opté pour la technique d'estimation des moindres carrés avec des variables indicatrices (*Least Squared Dummy Variable, LSDV*) développée par Bruno (2005). Disposant de 25 groupes et de 251 observations, ils concluent que seules les émissions à la période précédente et l'indice annuel de production du secteur énergétique sont significativement différentes de zéro (à 1 % de confiance) et influent donc sur les émissions de CO₂. Les variables climatiques, l'indice de production du secteur manufacturier¹³ et du coût de l'électricité ne sont pas significatives. Les auteurs soulignent que pendant la phase 1, du fait de

¹³ Code Eurostat NACE_D

l'allocation gratuite et en grande quantité des quotas carbone, le secteur manufacturier n'a effectivement pas été impacté par l'EU-ETS.

D'autres études ont été menées sur les facteurs explicatifs des émissions de CO₂ de l'EU ETS, au niveau des entreprises et des secteurs, ou encore de certains pays, mais jamais à l'échelle d'un grand nombre des pays couverts, et donc des installations, comme l'ambitionne la présente étude. Elles ont conclu que les émissions de CO₂ de l'EU ETS ont réagi : (i) au niveau des allocations de quotas, (ii) à l'activité économique, et (iii) au déploiement des énergies renouvelables. Ces études portent uniquement que la première phase ou au mieux au début de la deuxième phase de l'EU ETS.

Ainsi, en 2011, Albrell et al. se sont penchés sur l'évaluation de l'impact de l'EU ETS sur les entreprises. Leur étude porte sur un panel de plus de 2 000 entreprises européennes, suivies entre 2005 et 2008. Cette étude ne concerne cependant que les secteurs économiques et les observations s'arrêtent en 2008, c'est à dire juste au début de la crise économique. Ils démontrent toutefois que les allocations de quotas ont bien eu un impact en réduisant les émissions, mais ne précisent pas le rôle joué par la variabilité de l'activité économique. Kettner et al. (2011) étudient également l'évolution des émissions par secteur, sur une période qui inclut la crise économique (jusqu'à 2010). Leur analyse porte sur les surplus de quotas ainsi que sur l'activité économique de chaque secteur. Ils concluent que la forte baisse des émissions observée en 2009 est effectivement le reflet de la crise économique. De son côté, Chevallier (2011) s'intéresse aux ajustements non linéaires entre la production industrielle et les prix du carbone dans l'UE-27. Il démontre notamment que l'activité économique affecte probablement le prix du carbone mais avec un retard, du fait de contraintes institutionnelles spécifiques à ce marché.

Dans leur livre sur les enseignements du marché européen du carbone publié en 2010, Ellerman et al. consacrent l'un des chapitres aux réductions d'émissions et notamment la part imputable à la mise en place du système de quota associé au prix du carbone, ainsi qu'aux facteurs macro-économiques. Cette question est d'intérêt pour déterminer les scénarios contrefactuels et ainsi évaluer les quantités d'émissions de carbone réellement évitées. Les auteurs soulignent que les stratégies d'estimations macroéconomiques des émissions de carbone reposent essentiellement sur le principe que « *le niveau d'activité économique est un déterminant clé des émissions de CO₂* »¹⁴. Il est également indiqué que « *divers facteurs tels que les conditions météorologiques, les prix de l'énergie et l'évolution de l'activité économique des différents secteurs influencent la relation entre émissions et l'activité économique d'une année sur l'autre* »¹⁵, tout en précisant que l'utilisation de moyennes et agrégats tend à annuler ces variations annuelles et les erreurs. La question de la substitution de combustible comme source d'abattement est également abordée, notamment le rôle du prix relatif des énergies (gaz

¹⁴ Ellerman et al (2010), page 144

¹⁵ Ibid, page 145

et charbon en particulier). Des résultats sont mis en avant à la suite de la crise économique de 2001 (bulle Internet) montrant que des phénomènes contradictoires peuvent avoir lieu entre activité économique et émissions. Si la baisse de l'activité conduit effectivement à réduire les émissions, on peut s'attendre dans les années qui suivent (par exemple sur la période 2000-2004) à une augmentation des émissions du fait du ralentissement des efforts et investissements pour améliorer l'intensité carbone.

McGuinness & Ellerman (2008) proposent une étude économétrique concentrée sur le Royaume-Uni, portant sur l'utilisation des centrales électriques britanniques et leurs émissions de carbone avec le prix des énergies et du CO₂, ils utilisent une régression de panel à effet fixe. Enfin, Weigt et al (2012) s'intéressent à l'impact du déploiement des énergies renouvelables (EnR) en Allemagne sur la demande en quotas carbone (et donc sur les émissions de CO₂). Ils démontrent que, sur la période 2005-2011, de l'ordre de 10 à 16 % de la baisse des émissions de CO₂ de secteur électrique, peut s'expliquer par l'accroissement de la part des EnR dans le mix énergétique. Il apparaît également que la présence de l'EU-ETS a un impact positif sur ses réductions d'émissions de CO₂.

En termes d'évaluation des abattements réalisés par la mise en place du système EU ETS, une série d'études ont porté sur le bilan de la première phase (2005 à 2007). Ellerman et Buchner (2008) trouvent une réduction des émissions entre 50 et 100 millions de tonnes (Mt) ; Delarue et al. (2008a et 2008b) estiment des réductions comprises entre 34 et 88 Mt en 2005 et 19 et 59 Mt en 2006 ; Ellerman et Feilhauer (2008) concluent que les réductions se situent autour de 53 Mt (2005 et 2006) et enfin Ellerman et al (2010) estiment les réductions entre 120 et 300 Mt pour la première période. Il est intéressant de noter que les auteurs ne sont clairement pas unanimes pour relier le système ETS et le prix du carbone à ces réductions d'émissions, évoquant plutôt des effets de substitution entre le charbon et le gaz. Au contraire même, Widerberg et Wrake (2009) ont montré que dans certains pays (la Suède), il est « improbable que l'EU-ETS ait généré des réductions significatives des émissions de CO₂ ». Enfin, Anderson et Di Maria (2009) trouvent que « durant la période d'apprentissage de l'EU-ETS, les émissions de CO₂ ont été approximativement 113 Mt plus élevées que ce qu'elles auraient été en l'absence de l'EU-ETS ».

3. Description des variables et cadre de l'analyse

La revue de littérature a mis en avant un certain nombre de variables qui ont été régulièrement introduites pour expliquer l'évolution des émissions de carbone en Europe, soit directement, soit indirectement (par le biais du prix du carbone par exemple.)

Le choix des variables explicatives a donc été établi en fonction des causes communément admises et identifiées dans la précédente littérature académique, comme pouvant avoir un impact sur les

émissions de CO₂. La littérature et les publications institutionnelles suggèrent que l'évolution des émissions de carbone serait liée aux variables suivantes:

- l'activité économique. Les industries produisent plus, la demande en énergie est plus grande, ce qui induit des émissions des centrales électriques et des industriels plus élevées,
- les prix des énergies, et en particulier le prix relatif du charbon et du gaz. Les énergéticiens substituent soit des centrales au gaz soit au charbon, chacune de ces deux technologies impacte différemment les émissions de CO₂,
- le prix du CO₂. Un prix élevé favorise l'utilisation des énergies les moins émettrices de carbone,
- les politiques déployées par les Etats membres et la Commission européenne pour initier la transition vers une économie bas carbone à travers les politiques de soutien au développement des énergies renouvelables et de maîtrise de l'énergie,
- la délocalisation des émissions de carbone hors d'Europe,
- les facteurs climatiques. Par exemple un hiver particulièrement rigoureux implique une plus forte demande en énergie (chauffage) et donc un accroissement des émissions.

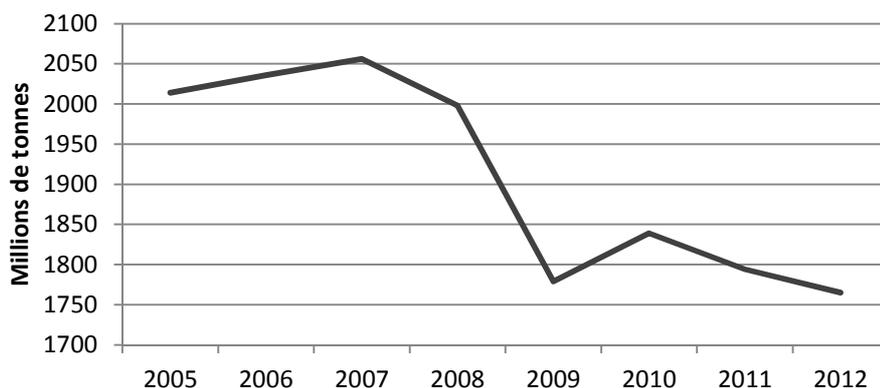
3.1 Les émissions de carbone, la variable expliquée

Les industries incluses dans le système EU-ETS doivent rapporter leurs émissions de CO₂ annuelles dans un registre centralisé nommé *European Union Transaction Log*, ou EUTL (ex CITL), qui est tenu par la Commission européenne et publiquement accessible¹⁶. Il permet d'avoir accès aux émissions déclarées chaque année par les industriels et producteurs d'énergie, ainsi qu'à toutes les transactions de quotas qui ont eu lieu au sein du système d'échange EU-ETS. A partir de cette base de données, les émissions en millions de tonne (Mt) ont été calculées pour chaque pays sur les années 2005-2012. Les émissions de CO₂ des pays recouvrent donc celles de tous les secteurs industriels inclus dans le système EU-ETS (graphique 1).

Du fait de l'évolution du périmètre des pays couverts par l'ETS, avec l'adjonction de nouveaux pays entre 2005 et 2008, il a été choisi d'exclure ces nouveaux pays. Le périmètre est donc maintenu constant en ne prenant pas en compte les émissions de la Bulgarie, la Roumanie (qui ont rejoint l'ETS en 2007), la Norvège ou encore de l'Islande (qui l'ont rejoint après 2008). Ces émissions comptent pour environ 4,5 % des émissions totales référencées dans la base EUTL sur l'ensemble des deux périodes.

¹⁶ www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/european-union-emissions-trading-scheme-eu-ets-data-from-EUTL-1

Graphique 1 – Evolution des émissions de CO₂ (périmètre constant)

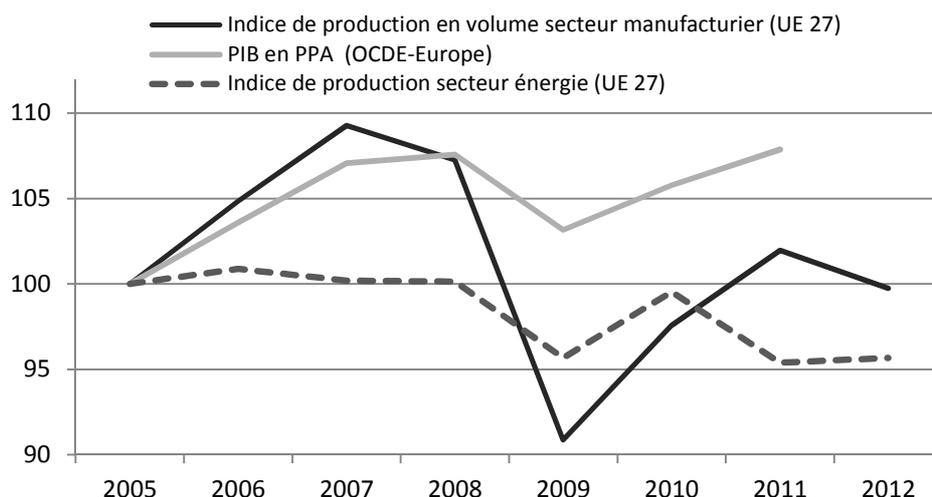


Source : EUTL, CDC Climat

3.2 Variables explicatives testées et retenues

Trois variables économiques ont été retenues (graphique 2): le PIB en milliards de dollars US constants (2005) calculé en Parité de pouvoir d'achat (PPA), issu de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE). Le PIB synthétise l'ensemble de l'activité économique, mais couvre beaucoup plus de secteurs que la seule industrie¹⁷. Le PIB est normalisé en base 100 (référence 2010). Les indicateurs du volume de production du secteur industriel¹⁸ et du secteur énergétique¹⁹ (en données ajustées des jours ouvrés, normalisés par rapport à l'année de référence 2010), sont issus de la base EUROSTAT. Ces deux indicateurs sont beaucoup plus fins que le PIB car spécifiques aux secteurs concernés par l'ETS.

Graphique 2 – Evolution du PIB et des indices de production des secteurs manufacturiers (M) et énergie (E). Base 100 en 2005, UE-27 pour les indices, OCDE-Europe pour le PIB



Source : EUROSTAT, AIE, CDC Climat

¹⁷ Comme il le sera précisé plus loin, la variable PIB est aussi introduite pour contrôler l'effet économique dans les variables d'efficacité économiques (TPES et ELEC) qui sont normalisées par le PIB respectif des pays du panel.

¹⁸ Secteur NACE « Manufacturing », code C

¹⁹ Secteur NACE « Electricity, gas, steam and air conditioning supply », code D35

Le charbon et le gaz (graphique 3) sont les deux principaux combustibles alimentant les centrales électriques thermiques à flamme en Europe. Leurs prix sont issus de la base Thompson-Reuters, avec pour le charbon : contrat API2 CIF ARA *Month Ahead*, et pour le gaz : contrat TTF *spot*. Les moyennes annuelles ont été calculées et les prix rapportés en euros par MWh²⁰. La conversion depuis les unités USD/tonne (charbon) et GBp/therm (gaz) sont effectuées selon la méthodologie employée par CDC Climat²¹, à savoir :

$$P_{\text{gaz}} (\text{€/MWh}) = \frac{P_{\text{gaz}} (\text{GBp/t/therm})}{100} \cdot FX_{(\text{GBP-€})} \cdot \theta$$

Avec θ : 1Therm(GB) = 29,3071 kWh

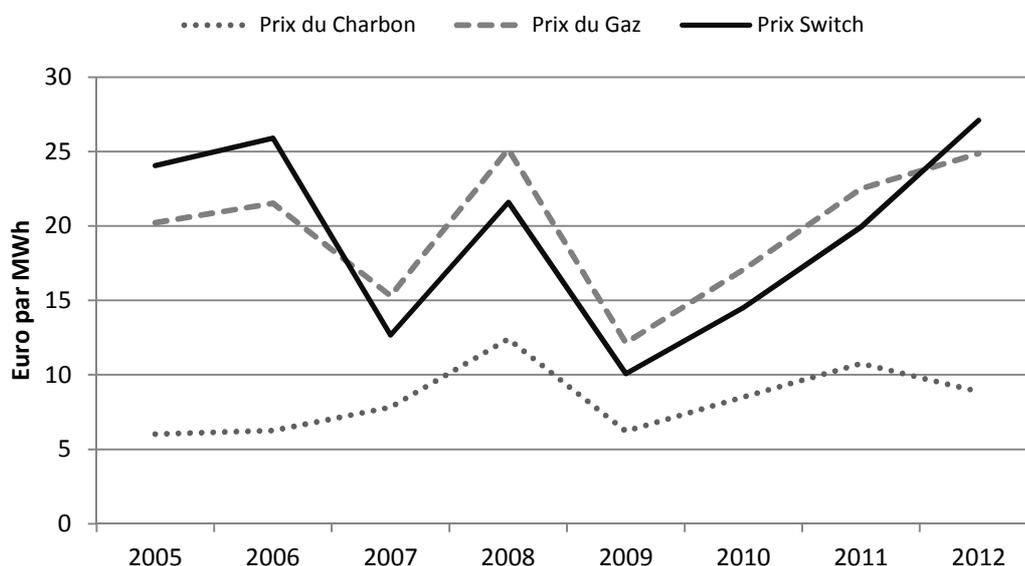
$$P_{\text{charbon}} (\text{€/MWh}) = \frac{P_{\text{charbon}} (\text{USD/t})/\varphi}{\omega} \cdot FX_{(\text{USD-€})}$$

Avec φ = 29,31 GJ/t
 ω = 0,2777 MWh / GJ

L'indicateur du Prix du *switch* est ensuite calculé. Il indique le prix fictif qui permet d'égaliser le *clean dark spread* et le *clean spark spread*. Il représente donc le prix du CO₂ au-dessus duquel il devient intéressant à court terme, pour un producteur électrique, de passer du charbon au gaz, et en-dessous duquel il est intéressant de passer du gaz au charbon²².

$$\text{Prix du switch} = \frac{\text{coût gaz} - \text{coût charbon}}{t\text{CO}_2 (\text{charbon}) - t\text{CO}_2 (\text{gaz})}$$

Graphique 3 – Prix moyen du charbon (prixC), du gaz (prixG) et prix *switch* en €/MWh



Source : Thompson Reuters, CDC Climat

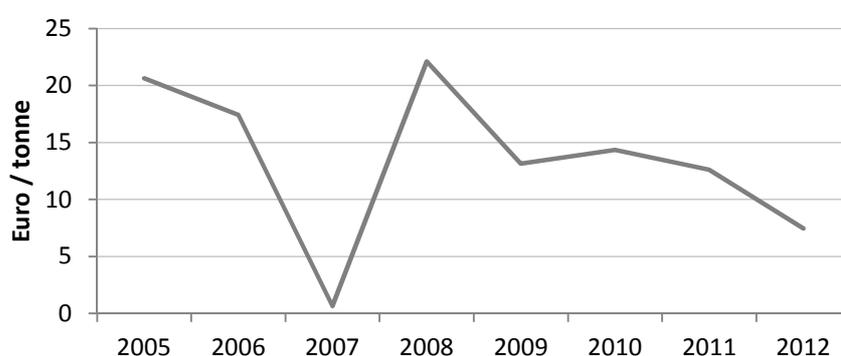
²⁰ Conversions EURO-GBP et EURO-USD sur la base de la moyenne annuelle du taux de change

²¹ www.cdclimat.com/spip.php?action=telecharger&arg=1300

²² Avec dans cette formule, Coût (gaz) : coût de production d'un MWh d'électricité sur la base des émissions nettes de CO₂ du gaz en €/MWh ; Coût (charbon) : coût de production d'un MWh d'électricité sur la base des émissions nettes de CO₂ du charbon en €/MWh ; tCO₂ (gaz) : émissions de CO₂ d'une centrale standard de gaz par MWh d'électricité (0,37) ; tCO₂ (charbon) : émissions de CO₂ d'une centrale standard de charbon par MWh d'électricité (0,96)

Le prix de la tonne de carbone (graphique 4) provient des cotations sur le marché ECX, les prix sont rapportés en moyenne annuelle puis convertis en euros au taux de change moyen annuel. Il a été choisi de prendre la valeur au comptant (marché *spot*) et non pas le prix du carbone sur le marché à terme (typiquement à un an), et en particulier de ne pas prendre pour la période 2005-07 le prix du marché de phase 2 (qui était pourtant existant)²³, car cette variable cherche à capturer les effets de substitution de court terme qui peuvent être induits par le prix du carbone. Les effets de long terme d'un prix du carbone durablement élevé se traduisent par des investissements et déploiements des technologies de réduction des émissions par l'amélioration de l'efficacité énergétique, effet qui est capturé par les variables correspondantes (voir plus bas).

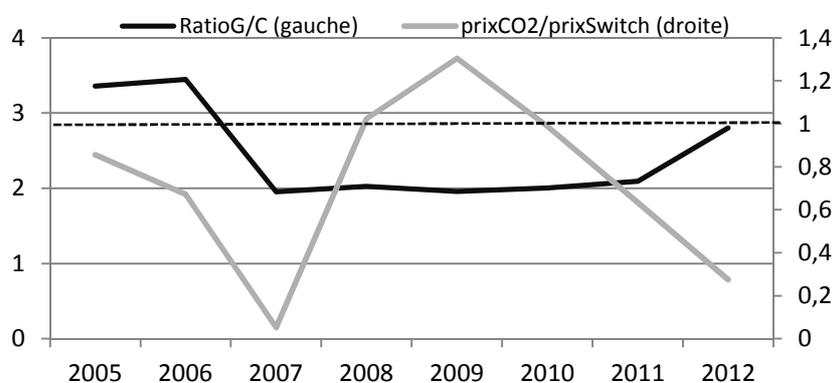
Graphique 4 – Prix moyen annuel *spot* de la tonne de carbone



Source : ECX et BNX, CDC Climat

Deux ratios ont été retenus (graphique 5): le prix du carbone sur celui du *switch* et le ratio du prix des énergies (charbon et gaz). Ils sont destinés à capturer des effets de substitution d'énergies plutôt de court terme, respectivement du fait d'une incitation par le prix du carbone d'une part et par le coût relatif de l'utilisation des deux énergies dans la production d'électricité d'autre part. Ces deux variables sont supposées évoluer identiquement pour tous les pays étudiés.

Graphique 5 – Ratio du prix du gaz sur le prix du charbon et ratio du prix du CO2 sur le prix switch



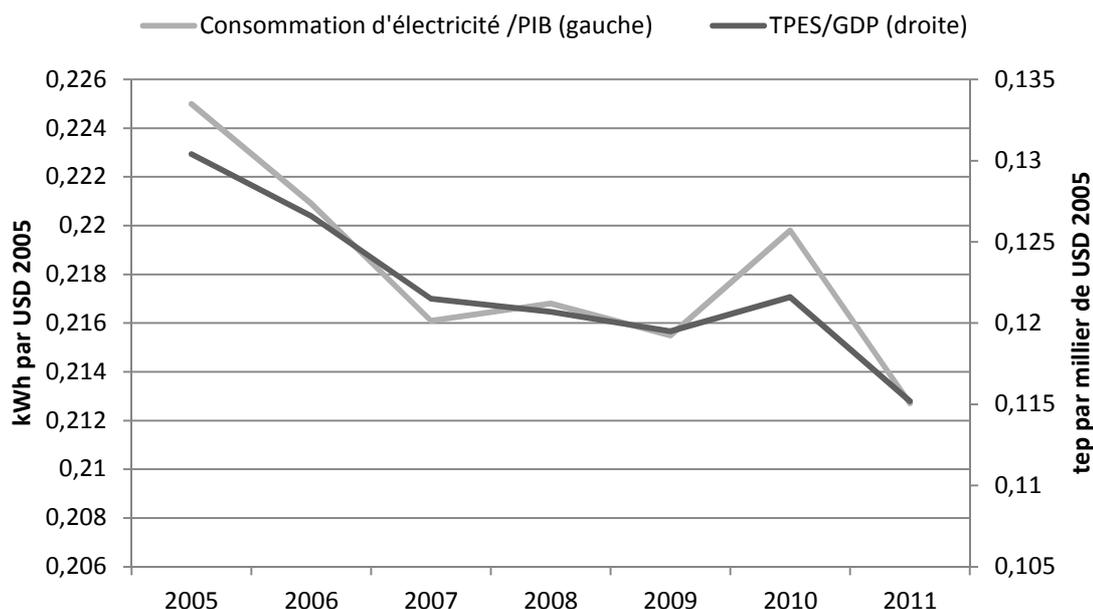
Source : ECX et BNX, CDC Climat

²³ Les quotas de phase 1 n'étaient pas transférables à la phase 2, cela correspond à l'existence de deux marchés distincts (phase 1 puis 2) et donc à deux prix différents.

Les politiques mises en œuvre en Europe dans la cadre des plans énergie-climat cherchent à développer les sources d'énergie renouvelables ainsi qu'à améliorer l'efficacité énergétique de l'économie (les fameux « 3 x 20% »). Il est légitime de supposer que ces politiques aient un impact sur l'évolution des émissions, avec un effet plutôt de long terme.

Comme grandeurs représentatives des efforts réalisés en termes d'efficacité énergétique, deux variables ont été retenues pour chacun des pays (graphique 6), toutes les deux issues des bases de données de l'Agence Internationale de l'Énergie : la consommation totale d'énergie primaire (en anglais *Total primary energy supply*, TPES) normalisée par le PIB de chaque pays (dollars constants 2005, calculé en PPA), ainsi que la consommation d'électricité, également rapportée au PIB. Il serait plus précis de dire que ces variables capturent l'évolution de l'intensité énergétique de l'économie, plus que l'efficacité énergétique. En effet, en plus des changements structurels de l'économie, elles capturent aussi les changements du mix énergétique, voir même un possible effet prix du carbone, par le biais d'investissements dans les technologies vertes.

Graphique 6 – Efficacité énergétique, UE-27



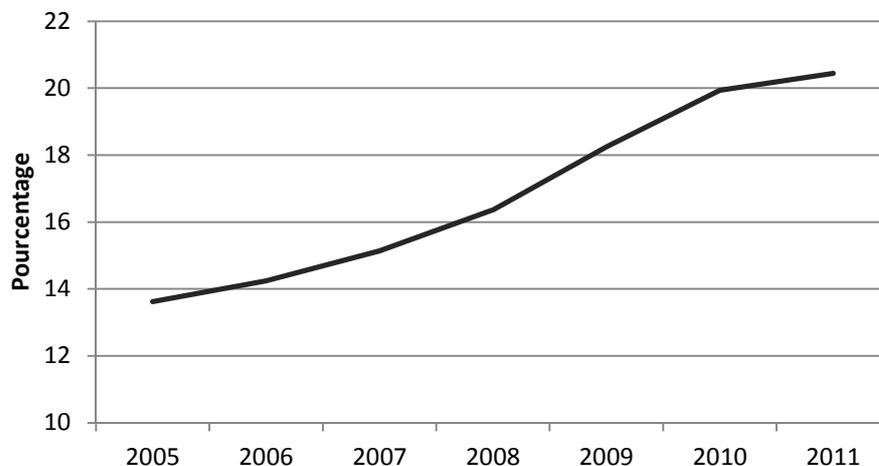
Source : Agence Internationale de l'Énergie

L'une des trois politiques clefs de l'UE en termes de lutte contre les émissions de carbone, est l'objectif – contraignant – d'atteindre 20 % d'énergies renouvelables (EnR) dans la production primaire d'énergie de l'Europe. Cet objectif ambitieux implique un accroissement important des EnR dans la production d'électricité des Etats membres. Etant donné l'importance du secteur de la production d'électricité dans les émissions rapportées dans la base EUTL (de l'ordre de 60 %), la part en pourcentage des sources d'énergie renouvelable dans la production électrique de chaque pays a été retenue (graphique 7). Les données sont issues de la base EUROSTAT, pour les années 2005-2011.

L'impact direct du déploiement des énergies renouvelables sur les émissions a été mis en évidence, au moins en Allemagne, par les récents travaux de Weigt et al. (2012).

Graphique 7 – Pourcentage d'électricité provenant de sources renouvelables, UE-27

Source : EUROSTAT



Source : EUROSTAT

Au-delà de la littérature économétrique actuelle, il est régulièrement avancé qu'une certaine part de la réduction des émissions de carbone en Europe s'explique aussi par la délocalisation de ces émissions. Afin de capturer cet effet potentiel, deux variables ont été explorées : l'indicateur des Investissements Direct à l'Étranger (IDE), provenant de la Banque Mondiale, ainsi que le ratio entre le volume des importations et celui de la production nationale. Ces variables ont été testées dans plusieurs analyses économétriques, mais sans résultats probants²⁴.

Afin de capturer un possible effet climatique, il a été exploré la possibilité d'inclure une variable capturant l'impact météorologique sur la production d'électricité²⁵. Cet indicateur exprime l'effet de la des conditions météorologiques sur la production d'électricité par rapport à la moyenne décennale 2000-2009. Malheureusement, l'indice n'est disponible que pour un nombre restreint de pays et n'a, au final, pas été inclus dans les analyses économétriques réalisées sur l'ensemble du panel. Le fait de ne pas

²⁴ Il est probable qu'aucune de ces deux variables ne capturent en fait de manière satisfaisante l'effet recherché des délocalisations d'émissions. En effet, pour la variable IDE, alors que les coefficients sont toujours fortement significatifs, quelque soient les modèles étudiés, ils tendent à indiquer qu'un accroissement en moyenne de 1 Md d'euro d'IDE sortant induirait une hausse de 10 % des émissions de carbone. On pouvait a priori attendre un effet opposé, l'accroissement du flux sortant d'IDE signifierait des investissements à l'étranger, des délocalisations de production et donc d'émissions de carbone. Deux éléments nous autorisent à rejeter cette variable pour capturer l'effet délocalisation. Le premier est que l'indicateur du flux sortant d'IDE n'est pas un bon proxy pour capturer l'effet de délocalisation. En effet, les flux d'IDE ont l'inconvénient de comptabiliser tous les flux intra-groupes et donc de surévaluer artificiellement les échanges de l'économie "réelle" (par exemple si une entreprise centralise sa trésorerie dans un pays, il s'ensuit divers flux financiers avec les filiales du groupe comptabilisés dans les IDE). La seconde explication serait que les flux d'IDE sont fortement liés à l'activité économique. Ainsi lorsque l'activité économique augmente, les émissions de carbone également, mais aussi les flux sortant d'IDE. De même, le ratio importation sur production n'est pas significatif dans les diverses analyses menées. L'idée motivant le choix de ce ratio était que si les délocalisations augmentent, les importations de bien croissent alors que la production au niveau national se réduit. Le ratio des deux devait donc fortement augmenter avec la délocalisation des activités.

²⁵ Climapact Metnext fournit à la CDC Climat, les indices de température pour un certain nombre de pays européens. Cet indice économique-climatique national est défini comme la moyenne quotidienne des températures des régions composant le pays, pondérée par la population de ces régions, laquelle constitue une bonne approximation du poids de l'activité économique régionale. A partir de cet indice, Metnext calcule le facteur d'impact météo sur la production d'électricité

inclure un effet climatique est conforté par deux raisons. D’une part, en le testant pour les 8 pays où il est disponible, il semblerait que son impact ne soit pas significatif. Bien entendu, au vu de la taille très limitée d’un tel panel, il n’est pas possible de tirer de conclusions définitives. D’autre part, du fait que l’unité temporelle de cette étude est l’année, toutes les variables doivent être moyennées sur l’année. Il a été supposé en conséquence que l’impact de la variable climatique n’est pas significatif car ses variations sont typiquement de l’ordre du mois. Ce choix peut être critiqué étant donné que les conditions climatiques peuvent avoir une certaine influence sur les émissions comme le note Ellerman et al (2010)²⁶.

Tableau 1 – Variables explicatives étudiées

Nom de la variable	Variable	Unité
Produit Intérieur Brut en PPA	PIB	Indice base 100 en 2010
Prix du charbon CIF ARA à 1 mois	prixC	euro / MWh
Prix du gaz TTF spot	prixG	euro / MWh
Prix du CO ₂	pCO2	euro
Pourcentage de renouvelable dans la prod. électrique	prctRE	%
Consommation d’électricité par point de PIB	ELEC ²⁷	kWh / USD (2005)
Prix du <i>switch</i> charbon – gaz	switchp	euro / MWh
Indice du volume de production secteur manufacturier	prodM	base 100 en 2010
Indice du volume de production secteur énergétique	prodE	base 100 en 2010
Consommation totale d’énergie par point de PIB	TPES ²¹	Tep ²⁸ /milliers d’USD (2005)
Ratio prix du gaz sur prix du charbon	ratioGC	Sans unité
Ratio prix du carbone sur prix du switch	CO2switch	MWh ⁻¹

3.2 Le périmètre géographique de l’étude

Le panel des données se constitue a priori des variables observées pour l’ensemble des pays inclus dans le système EU-ETS, à savoir les 28 Etats-Membres de l’Union européenne ainsi que la Norvège, l’Islande et le Liechtenstein. A partir des 31 pays qui composent le panel le plus large possible, il s’est avéré nécessaire de réduire sa taille à 22 pays. En effet, les données ne sont pas disponibles pour certains pays, soit qu’ils ont rejoint l’EU-ETS après 2005 (la Bulgarie, la Roumanie, la Norvège, la Croatie, le Liechtenstein et l’Islande), soit que les observations de certaines variables explicatives ne sont tout simplement pas accessibles (Malte, Chypre, ou encore la Belgique). Ces pays exclus comptent pour une part relativement faible des émissions totales, de l’ordre de 7,3% sur l’ensemble de la seconde période, dont 2,6% pour la Belgique et 2,7% pour la Roumanie. Lors des analyses économétriques (voir section 4 et annexe), il est apparu que l’inclusion de l’Estonie perturbait les estimations, ce pays a été subséquentement retiré du panel.

²⁶ Voir notamment page 151

²⁷ Les variables ELEC et TPES sont fortement corrélées (facteur de corrélation de 0.86) ce qui implique que ces deux variables ne doivent pas être testées simultanément dans une même régression

²⁸ Tonne équivalent pétrole

Le panel final comprend donc les 21 pays indiqués dans le tableau 2 et la base de données couvre les années 2005 à 2011. L'année 2012 n'est pas incluse car trop de variables explicatives sont manquantes (non publiées).

Tableau 2 -Panel des 21 pays suivis entre 2005 et 2011

Allemagne	Hongrie	Pologne
Autriche	Irlande	Portugal
Danemark	Italie	Rep. tchèque
Espagne	Lettonie	Royaume-Uni
Finlande	Lituanie	Slovaquie
France	Luxembourg	Slovénie
Grèce	Pays-Bas	Suède

La base comprend donc $21 \times 7 = 147$ observations, ce qui est relativement faible pour déployer une régression de panel, mais au-dessus de la limite empirique généralement admise de 120 observations.

4. Méthodologie et tests de robustesse

Dans le prolongement de l'approche choisie par Anderson et al (2009a), le modèle de régression de panel avec des effets fixes (FE, *Fixed effect*) a été retenu. Si les analyses se basant sur des tests d'Hausman tendent à montrer qu'une régression avec des effets aléatoires (RE, *Random effect*) est également possible²⁹, il paraît plus valable, en termes de justification économique, de choisir la régression de panel FE (en ayant toutefois conscience que les estimateurs ne seront alors peut-être pas les plus efficaces qu'il soit possible d'obtenir). En effet, on peut imaginer que chaque pays du panel présente des spécificités qui lui sont propres, spécificités que l'approche FE permet justement de capturer.

La première étape a consisté à étudier l'hypothèse d'homoscédasticité. Pour cela, il a été fait appel au test proposé par Wiggins et Poi³⁰. Il apparaît que l'hypothèse d'homoscédasticité doit être rejetée (avec LR Chi2 = 229,54). L'ensemble des régressions réalisées par la suite se fait donc avec le paramétrage *robust* pour tenir compte de l'hétéroscédasticité des variables. Il a alors été possible de réaliser une série de régressions qui ont permis de déterminer quelles sont les variables significativement différentes de zéro, puis de réaliser des régressions sur un modèle réduit aux seules variables significatives. Enfin, une approche de régression avec des variables indicatrices pour chaque pays (*dummies*), équivalente à une régression FE, a été effectuée afin de pouvoir accéder aux effets fixes pour chacun des pays du panel. L'ensemble des régressions sont réalisées sous le logiciel STATA 12.0.

²⁹ Voir Annexe

³⁰ Vince Wiggins et Brian Poi (StataCorp) Testing for panel-level heteroskedasticity and autocorrelation, juin 2001, révisé en décembre 2003. www.stata.com/support/faqs/statistics/panel-level-heteroskedasticity-and-autocorrelation/

La robustesse des modèles a été vérifiée par différents tests³¹: test de Hausman, test d'hétéroscédasticité, test d'autocorrélation, analyse des observations aux effets anormalement perturbateurs sur la régression³². Cette dernière analyse a été réalisée en calculant les DFBETA. Il apparaît que l'Estonie perturbe anormalement les estimations et a été en conséquence éliminée du panel. La robustesse du modèle a également été assurée en contrôle par l'inclusion de certaines variables – même non significatives (typiquement, contrôle par la variable PIB lors de l'inclusion des variables d'efficacité énergétique qui sont toutes deux rapportées au PIB³³) ainsi que par de multiples régressions avec un nombre réduit de variables (pour confirmer le caractère non significatif éventuel de l'une ou l'autre des variables clefs).

5. Modèles, résultats et analyses

Le premier modèle (1) testé inclut l'ensemble des variables pouvant jouer un rôle dans la détermination de la variable expliquée. Toutes les variables sont en log décimal³⁴, les coefficients estimés peuvent donc s'interpréter comme des élasticités.

Il apparaît d'emblée plusieurs premiers enseignements (tableau 3). Trois variables apparaissent sensiblement significatives : le pourcentage des EnR et l'indice de production manufacturier, ainsi que la variable d'efficacité énergétique TPES. L'indice de production du secteur énergétique *prodE* n'est pas significatif dans les deux cas. Ceci peut s'expliquer par la relative faible évolution, au cours des deux périodes, du volume de production de ce secteur comparé par exemple à celui du secteur manufacturier (voir le graphique 2). Il semble que le volume de production d'énergie en Europe ne soit, en fait, que modérément impacté par le ralentissement de l'activité économique (-5 % entre le point le plus haut et le plus bas sur la période observée, contre -20 % pour le secteur manufacturier). De même la variable PIB n'est pas significative, sans doute du fait qu'elle recouvre des secteurs économiques beaucoup plus larges que ceux couverts par l'EU ETS³⁵. Le ratio du prix du CO₂ sur le prix du *switch* ne semble pas être significatif, ce qui laisse déjà penser que le prix du CO₂ n'aurait qu'un impact limité sur la variable expliquée. Le ratio du prix des énergies n'est, quant à lui, pas significatif dans le modèle avec TPES, mais pourrait l'être dans le modèle avec la variable ELEC.

³¹ Voir annexe pour les résultats des tests réalisés sur le modèle (1)

³² Observations présentant un résidu important lors de la régression, c'est-à-dire des observations qui influencent anormalement les estimateurs des coefficients et leur précision.

³³ En effet, les variables ELEC et TPES ont pour objet de capturer principalement l'effet 'efficacité énergétique', c'est à dire la consommation d'énergie des pays (ce qui correspond à la mesure choisie par la Commission européenne dans son troisième objectif, de réduire la consommation d'énergie de 20 % d'ici 2020). La normalisation par l'activité économique permet d'obtenir des variables aux ordres de grandeurs comparables. Toutefois, l'introduction du PIB implique que la nouvelle variable peut capturer un certain effet de l'activité économique (voir notamment le graphique 6, l'année 2010), effet qui doit être préférablement capturé par les indices de production. L'inclusion de la variable PIB – même si elle n'est pas significative, permet de contrôler pour cet effet activité économique et simplifie l'interprétation des variables TPES et ELEC.

³⁴ Les ratios (prix du gaz sur prix du charbon, prix du CO₂ sur prix du switch, variables d'efficacité énergétique) sont toutes multipliés par 100 avant de prendre le log.

³⁵ Toutefois, il pourra s'avérer nécessaire de conserver cette variable pour contrôler l'effet PIB dans les variables d'efficacité énergétique (voir notes précédentes)

Modèle (1) et ses deux variantes

$$em_{it} = \beta_1 PIB_{it} + \beta_2 prctRE_{it} + \beta_3 prodM_{it} + \beta_4 prodE_{it} + \beta_5 ratioGC_{it} + \beta_6 CO2switch_{it} + \beta_7 \frac{TPES_{it}}{ELEC_{it}} + u_i + \varepsilon_{it}$$

Tableau 3

Modèle	(1 avec TPES)			(1 avec ELEC)		
	Coefficient	Err. standard	P> t	Coefficient	Err. standard	P> t
<i>PIB_{it}</i>	0.0772	0.3824	0.842	-0.2589	0.3347	0.449
<i>prctRE_{it}</i>	-0.0801 *	0.03128	0.019	-0.1368 **	0.0479	0.010
<i>prodM_{it}</i>	0.4709 ***	0.1091	0.000	0.4486 ***	0.1354	0.004
<i>prodE_{it}</i>	0.1851	0.1604	0.263	0.2965	0.2002	0.155
<i>ratioGC_{it}</i>	-0.00895	0.02732	0.747	0.04397	0.02928	0.150
<i>CO2switch_{it}</i>	-0.00384	0.00481	0.435	-0.00606	0.006175	0.338
<i>TPES_{it}</i>	0.8512 *	0.3468	0.024	-	-	-
<i>ELEC_{it}</i>	-	-	-	0.2566	0.2931	0.392
<i>Intercept</i>	-0.73492	1.0856	0.507	0.4399	1.0506	0.680

Nombre d'observation = 140, nombre de groupes = 20

Notes : *** indique une variable significativement différente de zéro au seuil de 1%, ** au seuil de 5% et * à 10%

Pour le modèle (1 TPES) : test de nullité jointe des variables F(7,22) = 13,96

Prob > F = 0,00%

Pour le modèle (1 ELEC) : test de nullité jointe des variables F(7,22) = 12,20

Prob > F = 0,00%

Les estimateurs des coefficients significatifs ou potentiellement significatifs, sont tous en cohérence avec les hypothèses de départ : comme attendu, un accroissement de la part des EnR dans la production électrique diminue les émissions, l'accroissement de l'activité manufacturière l'augmente, tout comme une hausse des variables ELEC ou TPES (ce qui correspond à une baisse de l'efficacité énergétique de l'économie). Enfin, dans le modèle (1 avec ELEC), l'estimateur du coefficient du ratio prix du gaz sur celui du charbon est positif, ce qui est cohérent avec l'interprétation suivante : une hausse de ce ratio (c'est-à-dire une hausse du prix du gaz et/ou une baisse du prix du charbon) entraîne une substitution de l'utilisation du charbon au lieu du gaz, ce qui entraîne bien une hausse des émissions de carbone³⁶.

A partir de ce modèle (1), il est possible de s'intéresser au modèle réduit en retirant les variables clairement non significatives, mais en conservant les variables dont on veut contrôler l'effet (PIB³⁷) ou dont on cherche plus précisément à étudier l'impact (CO2switch), ce sont les modèles (2) et (3).

Tableau 4

³⁶ Notons que, même si les coefficients ne sont pas significativement différents de zéro, l'estimateur du coefficient du ratio prix du CO2 sur prix du switch est du signe attendu (négatif) : une hausse de ce ratio signifie une hausse du prix du CO2 et/ou une baisse du prix du switch, ce qui incite à basculer vers des technologies moins émettrices de carbone et réduit donc bien les émissions de CO2.

³⁷ Voir annexe pour les résultats des régressions menées sans contrôler pour la variable PIB. Les estimateurs diffèrent légèrement pour la variable TPES

Modèle	(2)			(3)		
	Coefficient	Err. standard	P> t	Coefficient	Err. standard	P> t
PIB_{it}	-0.04987	0.3368	0.884	0.2271	0.4205	0.595
$prctRE_{it}$	-0.1758 ***	0.04095	0.000	-0.1175 ***	0.03995	0.008
$prodM_{it}$	0.4429 ***	0.1359	0.004	0.4467 ***	0.1203	0.001
$ratioGC_{it}$	0.05794 *	0.03095	0.076	-	-	-
$CO2switch_{it}$	-0.005811	0.006214	0.361	-0.00358	0.003925	0.373
$TPES_{it}$	-	-	-	0.8656 **	0.3273	0.016
$ELEC_{it}$	0.3415	0.27409	0.227	-	-	-
<i>Intercept</i>	0.41436	0.96701	0.673	-0.6807	1.1725	0.568

Nombre d'observation = 147, nombre de groupes = 21

Notes : *** indique une variable significativement différente de zéro au seuil de 1%, ** au seuil de 5% et * à 10%

Pour le modèle (2) : test de nullité jointe des variables $F(7,22) = 15,34$

Prob > F = 0,00%

Pour le modèle (3) : test de nullité jointe des variables $F(7,22) = 22,25$

Prob > F = 0,00%

Modèle (2)

$$em_{it} = \beta_1 PIB_{it} + \beta_2 prctRE_{it} + \beta_3 prodM_{it} + \beta_4 ratioGC_{it} + \beta_5 CO2switch_{it} + \beta_6 ELEC_{it} + u_i + \varepsilon_{it}$$

Modèle (3)

$$em_{it} = \beta_1 PIB_{it} + \beta_2 prctRE_{it} + \beta_3 prodM_{it} + \beta_4 CO2switch_{it} + \beta_5 TPES_{it} + u_i + \varepsilon_{it}$$

Il apparait clairement des modèles (2) et (3) que le ratio prix du CO₂ sur prix du *switch* n'explique pas, ou très faiblement, l'évolution des émissions de carbone dans le secteur EU ETS. Pour conforter la robustesse de cette analyse, qui tend à infirmer tout rôle du prix du carbone en tant que tel dans la réduction des émissions, un quatrième modèle a été testé (4). Il inclut directement le prix du CO₂ mais pas les variables d'efficacité énergétique dont on pourrait penser qu'elles peuvent capturer un certain effet prix du carbone via des investissements de long terme dans les technologies vertes. Alors que toutes les variables incluses sont significatives au moins au seuil de 5 %, la seule qui ne l'est pas est le prix de la tonne de carbone (tableau 5).

Modèle (4)

$$em_{it} = \beta_1 prctRE_{it} + \beta_2 prodM_{it} + \beta_3 pCO2_{it} + \beta_4 ratioGC_{it} + u_i + \varepsilon_{it}$$

Tableau 5

Modèle	(4)		
	Coefficient	Err. standard	P> t
$prctRE_{it}$	-0.1811 ***	0.03849	0.000

<i>prodM_{it}</i>	0.3669 ***	0.1033	0.002
<i>pCO_{2it}</i>	-0.00317	0.00255	0.228
<i>ratioGC_{it}</i>	0.09096 **	0.3857	0.029
<i>Intercept</i>	0.8549 ***	0.1918	0.000

Nombre d'observation = 147, nombre de groupes = 21

Notes : *** indique une variable significativement différente de zéro au seuil de 1%, ** au seuil de 5% et * à 10%

Pour le modèle (4) : test de nullité jointe des variables $F(7,22) = 25,43$
 Prob > F = 0,00%

Les modèles réduits (2) et (3) ainsi que le modèle (4) permettent de tirer un certain nombre de conclusion. Premièrement, dans l'évolution observée des émissions sur les deux périodes, l'analyse confirme le rôle de la crise économique, à travers l'activité industrielle mais pas l'activité du secteur énergétique. Elle montre également que le déploiement des énergies renouvelables dans la production d'électricité a certainement joué un rôle. Les deux modèles (2 et 3) donnent des élasticités de 0,12 à 0,17 pour le pourcentage d'EnR dans la production annuelle d'électricité, et de 0,44 pour l'indice de production en volume du secteur manufacturier. Ces valeurs sont proches, voire similaires, pour les deux modèles, renforçant leur robustesse. Cela signifie que la hausse de 1 % de la part des EnR induit une baisse entre 0,12 et 0,17 % des émissions couvertes par le secteur EU ETS, et la baisse de 1 % de l'indice de production du secteur manufacturier implique une baisse de 0,44 % des émissions.

La seconde conclusion est que le ratio du prix des énergies et l'efficacité énergétiques sont probablement également des variables qui contribuent à expliquer l'évolution des émissions de carbone. Toutefois, et cet aspect sera discuté plus longuement dans la dernière section, la question peut se poser quant à la pertinence des variables consommation d'électricité et consommation totale d'énergie primaire par point de PIB, comme mesure des efforts réalisés pour améliorer l'efficacité énergétique des pays européens.

Enfin, les modèles (2) et (3), renforcés par le modèle (4), ne permettent pas de déceler un impact éventuel du prix du CO₂ dans l'évolution observée des émissions de carbone dans l'EU-ETS. Etant donné que les variables ELEC/PIB et TPES/PIB ne sont pas incluses dans le modèle (4), ceci inclut l'effet possible du prix du carbone via les variables d'efficacité énergétique qui pourraient capturer l'impact d'investissements dans les technologies vertes. Ce dernier résultat tend à conforter l'hypothèse selon laquelle le prix du carbone sur l'ensemble des deux périodes (sauf peut-être sur la première année de chaque phase) est resté trop faible pour induire des investissements dans les technologies bas carbone. Il ne faut cependant pas en conclure que l'établissement d'un marché du carbone ne permet pas de réduire les émissions de CO₂. En effet, ce que montre l'analyse, c'est que ce sont justement la crise économique et le déploiement des EnR qui sont à l'origine de la baisse des

émissions. Or en générant d'importants surplus de quotas³⁸, ces deux facteurs (parmi d'autres) ont induit un prix du carbone durablement bas.

6. Modèle contrefactuel et estimation des impacts de chaque variable

L'analyse économétrique a permis d'établir deux modèles (l'un avec la variable de consommation d'électricité rapportée aux PIB³⁹, l'autre avec la consommation totale d'énergie primaire par point de PIB⁴⁰) avec des estimations des coefficients robustes et des ordres de grandeur des estimateurs des variables communes qui sont similaires entre eux.

La consistance de ces modèles a été vérifiée en calculant le volume total des émissions de carbone pour l'ensemble des installations ETS des pays du panel et pour chacune des années à partir des données d'activité du secteur manufacturier, du déploiement des EnR ainsi que de l'efficacité énergétique de chacun des pays ou encore le ratio du prix des énergies. Les émissions totales sont calculées comme la somme des émissions prédites pour chacun des Etats individuellement pour chacune des années (graphique 8).

L'écart⁴¹ entre les valeurs observées et les valeurs prédites par le modèle est faible dans les deux cas⁴² : respectivement 184 et 134 Mt pour l'ensemble de la période couverte pour le modèle (2) et le modèle (3)⁴³. Le modèle (3) présente une légère propension à mieux estimer les émissions : non seulement l'écart cumulé est inférieur de 50 Mt, mais il prédit plus fidèlement les changements dans l'évolution des émissions, notamment sur la période 2009-11. Ces deux valeurs (respectivement 184 et 134 Mt) ont servi d'estimation de l'erreur du pouvoir prédictif des modèles. En effet, elles permettent d'estimer l'ordre de grandeur de l'incertitude des émissions théoriques de manière globale sur la période 2005-11, indépendamment du niveau des émissions⁴⁴. L'incertitude du modèle (2) est donc ± 90 Mt et ± 65 Mt pour le modèle (3). L'estimation des incertitudes peut se faire en calculant l'écart en pourcentage pour chacune des années entre les valeurs théoriques et les valeurs observées (voir annexe 9). Enfin, une solution, qui n'a pas été utilisée ici, serait de calculer l'erreur à partir des fourchettes d'erreur de chacun des estimateurs des coefficients obtenus par les régressions.

³⁸ Actuellement de l'ordre de 1,7 GtCO₂ issus de la phase 2 et reportés en phase 3.

³⁹ Variable « ELEC »

⁴⁰ Variable « TPES »

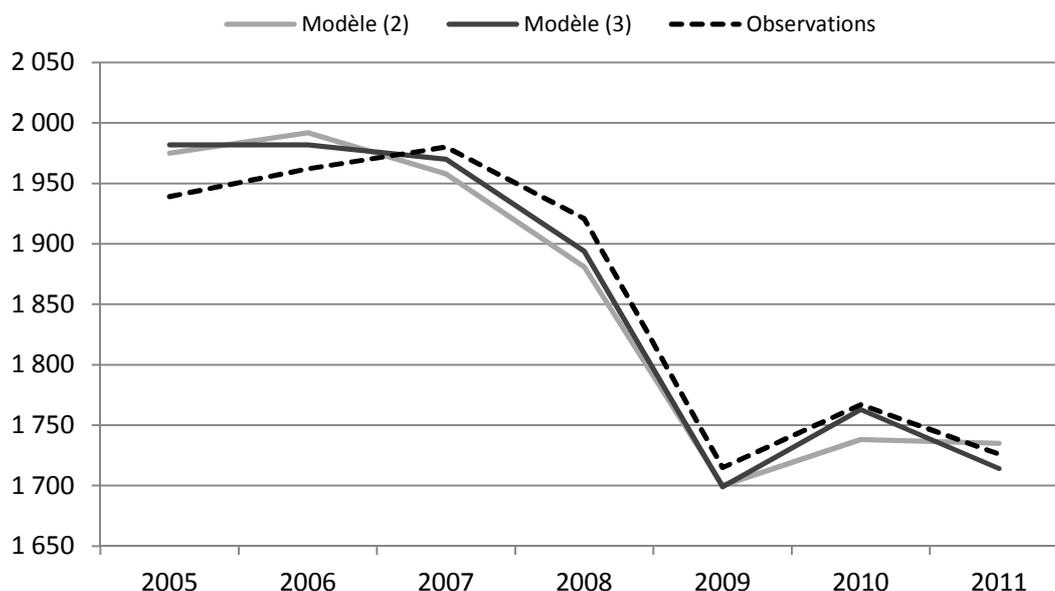
⁴¹ Ecart cumulé : somme des valeurs absolues des différences entre les valeurs prédites par les modèles et les émissions observées.

⁴² Voir l'annexe 9 pour le tableau des données correspondant au graphique 7.

⁴³ Pour rappel : le modèle (2) inclut la variable ELEC de la consommation d'électricité par point de PIB et le modèle (3), la variable TPES de la consommation totale d'énergie primaire par point de PIB. La variable PIB n'a pas été incluse dans la régression.

⁴⁴ Dans un modèle continu, cette grandeur correspondrait à l'aire entre la courbe des émissions théorique et celle des émissions observées.

Graphique 8 - Observation des émissions et leurs valeurs théoriques issues des modèles établis par l'analyse économétrique. Les valeurs sont en MtCO₂



L'analyse économétrique a donc permis d'établir deux modèles capables de retrouver avec une faible marge d'erreur les émissions observées. Ces deux modèles vont servir à déterminer les émissions contrefactuelles qui auraient été observées dans les conditions d'un scénario alternatif dit « au fil de l'eau » (AFE). Ce scénario AFE servira de référence pour estimer les abattements réalisés entre 2005 et 2011, ainsi que pour évaluer le poids des facteurs explicatifs qui ont été identifiés dans la section précédente. Comme le souligne Ellerman et al. (2010), « *puisque les abattements dépendent des émissions contrefactuelles, qui doivent être estimées, la quantité d'émissions réduites ne peut être connue avec certitude* »⁴⁵. Les résultats obtenus dans cette section doivent donc être toujours lus, interprétés ou utilisés en les rapprochant de ce scénario AFE et de ses hypothèses.

La méthodologie adoptée est la suivante. Pour chacun des deux modèles, les effets fixes sont tout d'abord estimés pour tous les pays du panel⁴⁶. Des données contrefactuelles correspondantes au scénario AFE sont ensuite établies, toujours pour chacun des pays du panel. En utilisant alors les deux modèles validés par l'analyse économétrique, il est possible d'estimer les émissions pour tous les pays et de les agréger pour chacune des années. Il est important de noter que le ratio du prix du CO₂ sur le prix du *switch* est conservé (malgré qu'il ne soit pas significatif) pour permettre l'utilisation des modèles (2) et (3) pour prédire les émissions de CO₂ dans un scénario AFE où le prix du carbone est quasi nul.

⁴⁵ Ellerman et al (2010), page 143

⁴⁶ Voir l'annexe 3 qui détaille les coefficients estimés, dont les effets fixes pour chaque pays, utilisés pour les deux modélisations contrefactuelles.

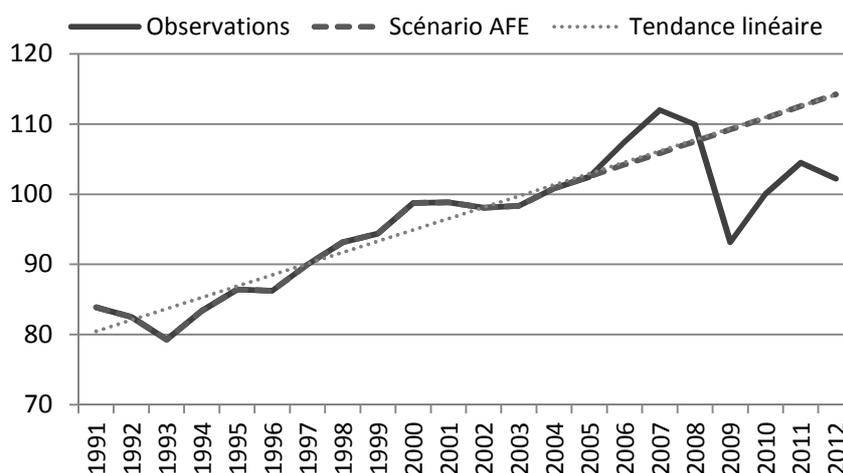
6.1 Le scénario contrefactuel dit « au fil de l'eau » (AFE)

La détermination d'un scénario contrefactuel qui propose un chemin alternatif à ce qui a été réellement observé entre 2005 et 2011 repose assurément sur une série d'hypothèses et d'estimations qui peuvent certainement prêter à critiques. Les variables suivantes alternatives ont été construites (i) pour tous les pays (voir tableau 6) : pourcentage de la production EnR, efficacité énergétique (consommation d'électricité/pib et consommation totale d'énergie/pib), et indice de production manufacturière ; (ii) commun à l'ensemble des pays : le ratio prix du carbone sur le prix du *switch* et le ratio du prix des énergies. L'approche générale qui a été adoptée ici a été de prolonger la tendance lourde ou l'évolution moyenne observée sur une à deux décennies précédentes à la période entre 2005 et 2011, et cela pour chacune des variables (i) et chacun des 21 pays du panel. En revanche, pour les données (ii) communes aux Etats, il a été choisi de prendre un ratio des énergies maintenu constant à son niveau de l'année 2005 et un prix du carbone constant à 1€/tonne, c'est-à-dire très faible⁴⁷. Les graphiques suivants illustrent les données contrefactuelles admises dans le scénario AFE au niveau de l'UE 27.

Tableau 6 - Résumé des hypothèses du scénario alternatif AFE

Variable	Observé	Contrefactuel (AFE)
Activité économique (manufacturière)	Chute brutale en 2009	Croissance 1,6% par an
Déploiement des EnR	Hausse avec accélération	Limité
Efficacité énergétique	Augmentation	Augmentation moins forte
Prix du carbone	Varie entre 3 et 23 €/t	Constant à 1 €/t
Ratio des énergies	Varie	Constant au niveau de 2005

Graphique 9- Indice de production manufacturier (base 100 en 2010)

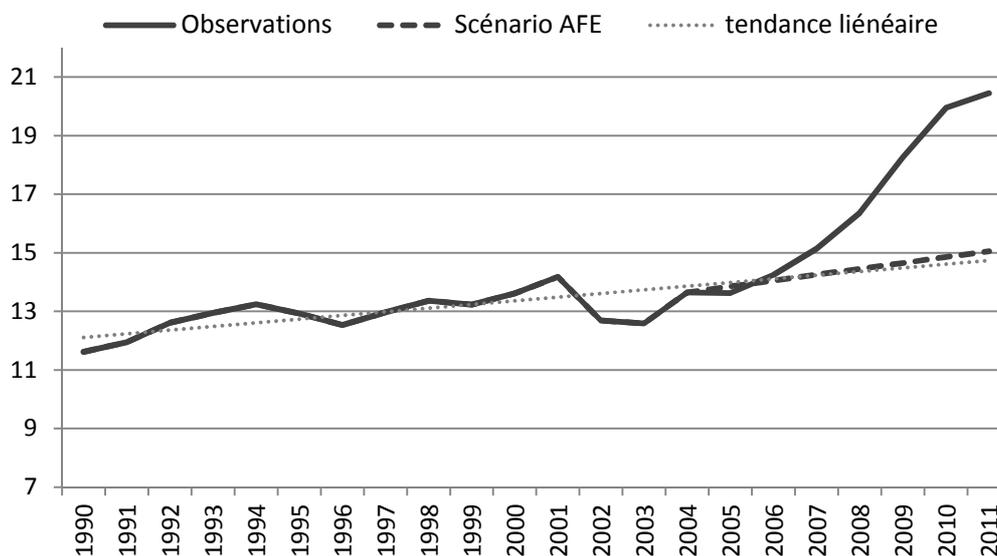


Pour l'indice de production du secteur manufacturier (graphique 9), l'évolution alternative proposée poursuit au taux de croissance de 1,6 % par an dans le prolongement de l'évolution antérieure à 2005,

⁴⁷ Pour des raisons pratiques, il n'était pas possible de simplement prendre un prix du carbone à zéro.

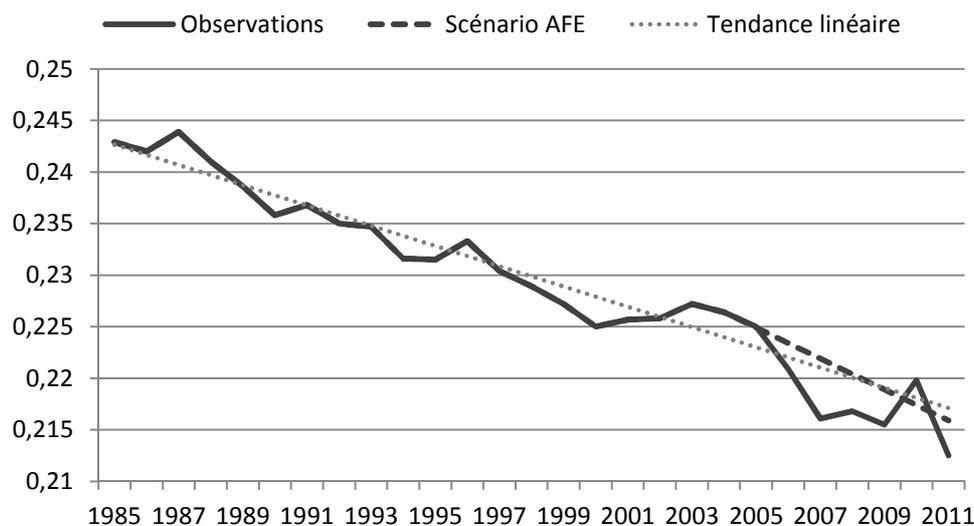
ce qui est moins rapide que sur la période 2005-08. Dans ce scénario AFE, la crise économique débutée en 2008 n'a donc pas lieu et en 2011, le niveau de production est 11,6 % supérieur à celui de 2004 (dans la réalité, il est 3,6 % supérieur).

Graphique 10 - Pourcentage des EnR dans la production d'électricité (UE 27)

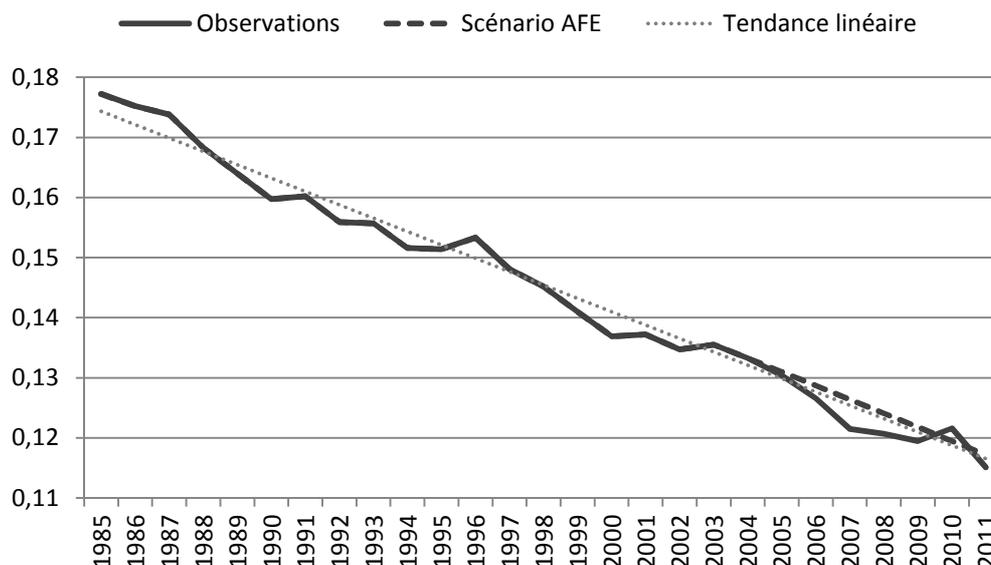


On observe très clairement une accélération du déploiement des EnR dans la production d'électricité à partir des années 2005-06 (graphique 10). Le scénario AFE propose une hausse modérée de 0,2 points par an, dans le prolongement de la tendance initiée depuis le début des années 1990, pour atteindre + 10,2 % d'augmentation en 2011 par rapport au niveau de 2004 (contre + 49,7 % observé).

Graphique 11. Consommation d'électricité par point de PIB (kWh/USD 2005) au niveau OCDE-Europe



Graphique 12. Consommation totale d'énergie primaire par point de PIB (tep/k.USD 2005) au niveau OCDE-Europe



Les valeurs proposées dans le cadre du scénario AFE pour les deux variables capturant l'efficacité énergétique (consommation d'électricité et consommation totale d'énergie primaire par point de PIB) sont proches de celles observées, en étant toutefois plutôt supérieure (c'est-à-dire une efficacité énergétique moindre).

Pour rappel, le ratio du prix des énergies est supposé se maintenir constant au niveau de 2005 (valeur de 3,36) et le prix du CO₂ est fixé constant sur l'ensemble de la période 2005-11 à 1€/tonne, modifiant le ratio prix du carbone sur prix du *switch* en conséquence.

La validité de l'ensemble de ces hypothèses peut être discutée. Par exemple, est-il valable de considérer que la croissance économique se poursuive sur le rythme antérieur à 2005 sans développement important des EnR ? En effet, une situation économique plutôt favorable aux investissements publics et privés pourrait impliquer une croissance des énergies vertes, ce qui n'est pas l'hypothèse AFE. De même, est-il compatible de considérer que le ratio des prix du gaz et du charbon reste constant au niveau de 2005, alors que l'activité industrielle en Europe croît au rythme de 1,6 % par an ? Etablir des données contrefactuelles prenant en compte de telles questions impliquerait l'utilisation de modèles d'équilibre économique autrement plus complexes, ce qui n'a pas été possible de faire pour cette étude. Enfin, pour mémoire, la Commission européenne a fait reposer la plupart de ses objectifs et hypothèses sur un scénario établi avant 2008 (modèle PRIMES) qui ne comprend pas la crise économique et table ainsi sur une hypothèse de croissance du PIB de +2,2 % par an.

6.2 Abattements estimés par rapport au scénario de référence AFE

Disposant pour chaque pays du panel des données correspondantes au scénario AFE, les modèles (2) et (3) permettent donc de prédire les émissions agrégées contrefactuelles. Celles-ci servent de

référence pour déterminer les abattements réalisés durant la période 2005-11 pour le secteur couvert par l'EU ETS. Le modèle utilisant la variable consommation d'électricité/PIB (ELEC) estime l'abattement sur l'ensemble des deux périodes à 1 324 Mt (\pm 90 Mt), celui utilisant la variable consommation totale d'énergie par point de PIB (TPES) estime l'abattement total par rapport au scénario AFE à 1 151 Mt (\pm 65 Mt). Le détail des réductions des émissions de CO₂ par année est donné dans le tableau 7. Le modèle (3) est celui avec la plus petite marge d'erreur.

Tableau 7. Estimation des réductions des émissions de CO₂ pour chacun des modèles par rapport au scénario AFE (en Mt)

	Modèle (2)⁴⁸	Modèle (3)⁴⁹
2005	60	68
2006	52	65
2007	109	68
2008	175	138
2009	321	300
2010	295	236
2011	312	275
Cumul	1 324	1 151

L'abattement cumulé sur la première phase (2005-07) est relativement modeste, de l'ordre de 200 à 220 Mt, celui sur la deuxième phase (2008-11) est estimé entre 950 et 1 100 Mt. Il est déjà possible de d'observer l'impact de la crise avec une réduction des émissions particulièrement importante en 2009 qui correspond à la pire année de la récession économique.

La revue de littérature a relevé un certain nombre d'études de différents auteurs qui estiment les abattements réalisés au niveau de l'EU ETS pendant la première phase. Les chiffres varient entre 500 et 300 Mt, plus souvent entre 50 et 120 Mt. Le modèle de cette étude propose donc des estimations du même ordre de grandeur, renforçant la confiance dans la validité de ce modèle.

6.3 Origine de la baisse des émissions

L'analyse peut être affinée afin d'évaluer quel est l'origine des réductions d'émissions de CO₂ estimées par les modèles. Du fait de la linéarité des modèles (2) et (3), il est possible d'isoler l'impact de chacune des variables prises séparément⁵⁰. Les résultats détaillés sont présentés en annexe 10. Le tableau 8 résume les abattements induits par chaque secteur en pourcentage du total et en valeur.

⁴⁸ Modèle avec la variable consommation d'électricité par point de PIB (variable ELEC)

⁴⁹ Modèle avec la variable consommation totale d'énergie primaire par point de PIB (variable TPES)

⁵⁰ Les émissions sont prédites par le modèle en introduisant seulement l'une des variables avec ses données contrefactuelles du scénario AFE et en conservant les autres variables avec leurs données réelles.

Tableau 8 -Estimation des abatements induits par chacune des variables sur l'ensemble des deux périodes en Mt et en pourcentage des abatements totaux

		EnR	Activité économique	Efficacité énergétique	Prix du CO ₂	Substitution prix énergie
Modèle (2)	%	48,6	22,4	10,3	-1,0	19,8
	Mt	643	296	136	-13	262
Modèle (3)	%	39,5	30,0	20,4	10,1	-
	Mt	454	346	235	116	-

L'erreur est de l'ordre de ± 90 Mt pour le modèle (2) et ± 65 Mt pour le modèle (3).

Par rapport au scénario de référence AFE, il apparaît que la principale origine de la baisse observée des émissions sur la période 2005-11 serait le déploiement des énergies renouvelables dans la production d'électricité, comptant pour un abatement cumulé de l'ordre de 500 Mt (40 à 50 % de l'ensemble des abatements), suivi de la crise économique, à travers la baisse de la production du secteur manufacturier avec environ 300 Mt (soit 20 à 30 %) puis, et probablement au même niveau, l'amélioration de l'efficacité énergétique de l'économie entre 100 et 200 Mt (soit entre 10 et 20 %) et des réductions d'émissions de CO₂ par substitution de combustible du fait de leur prix respectifs avec environ 200 Mt (soit environ 20 %). L'impact du prix du carbone serait faible voire nul (entre 0 et 10 %), et du même ordre de grandeur que le niveau d'erreur du modèle, ce qui ne permet pas de conclure plus précisément.

6.4 Remarques et limitations sur les résultats

Les estimations obtenues sont uniquement le résultat de la formalisation d'un scénario de référence AFE et de ses hypothèses. Ce sont donc, avant tout, les ordres de grandeur qui doivent être retenus ainsi que la hiérarchie de l'importance de l'impact de chacune des variables.

La variable utilisée pour capturer l'effet « politique EnR », à savoir le pourcentage des énergies renouvelables dans la production électrique nationale, ne permet pas de distinguer les énergies hydrauliques (environ 15 %⁵¹ de la production totale d'énergie électrique de l'Union européenne) des autres énergies renouvelables (éolien, photovoltaïque et biomasse en particulier, qui comptent pour moins de 7 % de la production d'électricité de l'Union européenne⁵⁰) qui doivent supporter principalement la croissance nécessaire pour atteindre les objectifs de 2020 (Commission européenne, 2013). Un approfondissement futur de cette étude pourrait s'attacher à détailler et distinguer l'origine des abatements dus aux EnR en fonction du type d'énergie renouvelables.

Comme souligné au début de l'étude, il n'est pas évident que les variables retenues (consommation totale d'énergie primaire par point de PIB et consommation d'électricité par point de PIB) puissent

⁵¹ CDC Climat, Tendances Carbone

être directement interprétées comme le reflet de l'efficacité énergétique, elles correspondent effectivement plutôt à une intensité énergétique de l'économie. Il faut toutefois noter que la Commission européenne mentionne aussi bien « *une réduction de 20 % de la consommation annuelle d'énergie primaire en Europe d'ici à 2020* »⁵² que « *accroître de 20 % l'efficacité énergétique d'ici à 2020* »⁵³ : il ne semble pas y avoir de définition précise et consensuelle de ce qu'on entend par « améliorer l'efficacité énergétique de l'UE ». Dans le modèle économétrique, les deux variables retenues capturent probablement un ensemble d'effets plus larges que la seule 'efficacité énergétique'. En plus des changements structurels de l'économie, elles capturent aussi les changements du mix énergétique (par exemple, l'arrêt des centrales nucléaires en Allemagne induit une hausse du ratio énergie primaire sur PIB car l'électronucléaire a une efficacité thermique plus faible que, par exemple, des centrales au gaz à cycle combiné⁵⁴). Enfin, ces variables pourraient également, à priori, capturer un possible impact du prix du carbone par le biais d'investissements dans les technologies vertes améliorant justement l'efficacité énergétique. Cependant, comme indiqué plus haut, le modèle (4) tend à invalider cette hypothèse. Enfin, ces variables captent probablement un peu de la crise économique à travers la normalisation par le PIB, ce qui fait que l'effet de la crise est peut-être légèrement sous-estimé dans les résultats de la section 6.3.

Conclusion

L'analyse économétrique portant sur un panel de 21 pays couvrant environ 93 % des émissions de carbone incluses dans le système européen d'échange de quotas (EU-ETS) permet d'apporter plusieurs éclairages sur les causes possibles de l'évolution baissière des émissions de carbone émises par les installations couvertes par cette régulation (-7,3 % entre 2005 et 2012). Globalement, ce seraient donc entre 600 et 700 Mt (soit 50 à 70 %), des quelques 1,1 GtCO₂ de réductions d'émissions de CO₂ estimées entre 2005 et 2011, qui résulteraient des politiques déployées pour les objectifs européens d'atteinte des 20 % d'énergie renouvelable dans la consommation énergétique finale en 2020 (abattement d'environ 500 Mt) et de l'amélioration de l'intensité énergétique avec la réduction de 20 % de la consommation énergétique primaire d'ici 2020 (abattement entre 100 et 200 Mt). La crise économique a joué un rôle significatif mais pas prépondérant dans la baisse des émissions, rôle estimé à 300 Mt, soit entre 20 et 30 %. Des effets de substitution par le prix entre le charbon et le gaz semblent avoir également affecté les émissions, pour environ 200 Mt. Ces estimations reposent sur les hypothèses du scénario de référence, dit au « fil de l'eau » défini dans cette étude.

⁵² http://ec.europa.eu/energy/efficiency/index_fr.htm

⁵³ http://ec.europa.eu/energy/efficiency/eed/eed_fr.htm

⁵⁴ Le rapport d'énergie électrique produite sur l'énergie primaire est d'environ 33% pour le nucléaire, 60% pour les centrales à gaz à cycle combiné. Passer des centrales nucléaires à des centrales au gaz, induit une baisse de la consommation primaire d'énergie par point de PIB et donc une amélioration de l'efficacité énergétique

L'analyse économétrique et les modèles ne permettent pas de déceler un impact éventuel du prix du carbone et concluent à un faible rôle du prix du carbone dans la baisse observée des émissions. Toutefois, il est important de souligner que la crise économique, associée au développement des EnR est à l'origine de la baisse de ce prix du CO₂, rendant justement son influence marginale pour des réductions d'émissions de CO₂ dans les installations couvertes au sein de l'Union européenne. Le prix du CO₂ révélé par l'EU ETS a aussi contribué à la réduction de 1 048 MtCO₂ au-delà de l'Union européenne à travers l'utilisation de crédits carbone internationaux issus des mécanismes de projets MDP et MOC par les installations de l'EU ETS de 2008 à 2012.

Bibliographie

- Abrell, J., Ndoye Faye A. & Zachmann, G. (2011), “Assessing the impact of the EU ETS using firm level data”, Bureau d’Economie Theorique et Appliquée, Document de Travail n° 2011 – 15
- Alberola, E., Chevalier, J., and Chèze, B. (2008) “Price Drivers and Structural Breaks in European Carbon Prices 2005–2007”. *Energy Policy*, 36(2), 787-797.
- Alberola, E., Chevallier, J., & Chèze, B. (2009) “Emissions Compliances and Carbon Prices under the EU ETS: A Country Specific Analysis of Industrial Sectors”, *Journal of Policy Modeling* 31(3), 446-462.
- Anderson B., Di Maria C. & Convey F. (2009a), “Abatement and allocation in the pilot phase of the EU-ETS”, *Irish Economic Association*
- Anderson, B., & C. di Maria (2009b) Abatement and allocation in the pilot phase of the EU ETS, Paper presented at the 17th Annual Conference of the European Association of Environmental Resource Economics (EAERE), Amsterdam, June 24-27, 2009.
- Anderson, B., & C. di Maria (2011) Abatement and Allocation in the Pilot Phase of the EU ETS, *Environ Resource Econ* (2011) 48:83–103
- Berghmans, N. (2012) *Efficacité énergétique, énergie renouvelable et quotas de CO2 en Europe : un besoin de coordination*, Point Climat n° 18, septembre 2012, CDC Climat
- Bruno, G. S. F. (2005), “Estimation and inference in dynamic unbalanced panel-data models with a small number of individuals”, *Stata Journal* 5(4), 473-500
- Bunn, D.W. & Fezzi, C. (2007) *Interaction of European Carbon Trading and Energy Prices*, FEEM Working Paper No. 63.2007. Disponible: <http://ssrn.com/abstract=993791> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.993791>
- Capros, P., Mantzos, L., Papandreou, V. & Tasios N. (2008) *Model-based Analysis of the 2008 EU Policy Package on Climate Change and Renewables*, Report to the European Commission - DG ENV
- Chevallier J. (2011) “Evaluating the carbon-macroeconomy relationship: Evidence from threshold vector error-correction and Markov-switching VAR models”, *Economic Modeling*, Volume 28, Issue 6, November 2011, Pages 2634–2656
- Commission européenne (2013), Rapport de la commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions, Rapport sur les progrès accomplis dans le secteur des énergies renouvelables, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:52013DC0175:FR:NOT>
- Delarue, E., D. Ellerman, and W. D’haeseleer (2008a): Short-term CO2 Abatement in 32 the European Power Sector, University of Leuven, Belgium, and MIT, Massachusetts, USA.
- Delarue, E., K. Voorspoels, and W. D’haeseleer (2008b): “Fuel Switching in the Electricity Sector in the EU ETS: Review and Prospective”, *Journal of Energy Engineering*, Vol. 134. No. 2, pp. 40-46.
- Ellerman D., Convery, F. & de Perthuis, C. (2010), *Le prix du carbone – Les enseignements du marché européen du CO₂*, Pearson

Ellerman, D. et B. Buchner (2008): “Over-Allocation or Abatement? A Preliminary Analysis of the EU ETS Based on the 2005-06 Emissions Data”, *Environmental Resource Economics*, Vol. 41, pp 267-287.

Ellerman, D., and S. Feilhauer (2008): A Top-down and Bottom-up look at Emissions Abatement in Germany in response to the EU ETS, CEEPR Working Paper No. 08-017, MIT, Massachusetts, USA.

Hervé-Mignucci M. (2011), *Rôle du signal prix du carbone sur les décisions d'investissement des entreprises*, thèse sous la direction du Professeur Jan-Horst Keppler, Université Paris-Dauphine.

Kettner C., Kletzan-Slamanig, D. & Köppl A. (2011), “The EU Emission Trading Scheme – Sectoral allocation patterns and the effects of the economic crisis”, *Rapport pour le projet ETCLIP “The Challenge of the European carbon market – emission trading, carbon leakage and instruments to stabilize the CO2 price”*

Mansanet-Bataller, M., Pardo, A. & Valor, E. (2007) “CO2 Prices, Energy and Weather”. *The Energy Journal* 28, 73-92.

McGuinness, M. & Ellerman, A. D. (2008), *CO2 abatement in the UK power sector: evidence from EU ETS trial period*, Working paper n° 2008-010. Boston, Center for Energy and Environmental Policy Research, MIT

Sijm J.P.M. (2009) Tradable Carbon Allowances: The experience of the EU and lessons learned, Paper presented at the EWC/KDI Conference “Climate Change and Green Growth: Korea’s National Growth Strategy” Honolulu, Hawaii, 23-24 July 2009

Weigt H., Delarue E. & Ellerman D. (2012) CO2 Abatement from Renewable Energy Injections in the German Electricity Sector: Does a CO2 Price Help? CEEPR WP 2012-003

Widerberg, A., and M. Wrake (2009): The Impact of the EU Emissions Trading Scheme on CO2 Intensity in Electricity Generation, Working Papers in Economics No. 361, School of Business, Economics and Law, University of Gothenburg, Sweden

Wooldridge, J. M. (2002) *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*. Cambridge, MA: MIT Press

Annexes

1. Emissions de CO₂ pour les pays du système EU-ETS en millions de tonne

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Total
AT	33,4	32,4	31,8	32,1	27,4	30,9	30,6	29,6	248,1
BE	55,4	54,8	52,8	55,5	46,2	50,1	46,2	43,8	404,7
BG	0,0	0,0	39,2	38,3	32,0	33,5	40,0	0,3	183,3
CY	5,1	5,3	5,4	5,6	5,4	5,1	4,6	0,0	36,3
CZ	82,5	83,6	87,8	80,4	73,8	75,6	74,2	69,3	627,2
DE	475,1	478,1	487,1	472,7	428,3	454,9	450,3	463,3	3 709,7
DK	26,5	34,2	29,4	26,5	25,5	25,3	21,5	18,3	207,1
EE	12,6	12,1	15,3	13,5	10,4	14,5	14,8	13,6	106,9
ES	183,6	179,7	186,6	163,5	136,9	121,5	132,7	139,9	1 244,3
FI	33,1	44,6	42,5	36,2	34,3	41,3	35,1	30,7	297,8
FR	131,3	127,0	126,6	124,1	111,1	115,2	105,1	89,1	929,5
GB	242,5	251,2	256,6	265,1	231,9	237,4	220,9	247,0	1 952,5
GR	71,3	70,0	72,7	69,9	63,7	59,9	58,8	62,3	528,5
HU	26,2	25,8	26,8	27,2	22,4	23,0	22,5	21,1	195,0
IE	22,4	21,7	21,2	20,4	17,2	17,4	15,8	26,2	162,3
IS	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4
IT	225,6	227,4	226,4	220,7	184,9	191,5	189,9	181,2	1 647,6
LI	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
LT	6,6	6,5	6,0	6,1	5,8	6,4	5,6	5,8	48,8
LU	2,6	2,7	2,6	2,1	2,2	2,3	2,1	2,0	18,5
LV	2,9	2,9	2,8	2,7	2,5	3,2	2,9	3,0	23,1
MT	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	2,3	16,0
NL	80,4	76,7	79,9	83,5	81,0	84,7	80,0	80,1	646,3
NO	0,0	0,0	0,0	19,3	19,2	19,3	19,2	0,0	77,1
PL	203,1	209,6	209,6	204,1	191,2	199,7	203,0	196,2	1 616,6
PT	36,4	33,1	31,2	29,9	28,3	24,2	25,0	25,2	233,3
RO	0,0	0,0	69,6	64,1	49,0	47,3	51,2	47,8	329,1
SE	19,4	19,9	19,0	20,1	17,5	22,7	19,9	18,3	156,7
SI	8,7	8,8	9,0	8,9	8,1	8,1	8,0	7,7	67,3
SK	25,2	25,5	24,5	25,3	21,6	21,7	22,2	17,9	184,1
Total	2 013,7	2 035,7	2 164,7	2 119,8	1 879,5	1 938,5	1 903,8	1 842,3	15 898,1

Source: base EUTL

2. Données statistiques sur les observations

Variable	Obs.	Moyenne	Dev. std.	Min	Max
émission	147	88,50	111,55	2,05	487,15
pCO2	147	14,41	6,57	0,66	22,11
prctRE	147	20,11	16,54	2,64	67,69
CO2/switch	147	0,79	0,37	0,052	1,31
prixGaz/prixCharb	147	2,41	0,63	1,95	3,45
prodM	147	103,14	10,67	65,54	129,51
prodE	140	99,33	6,83	81,79	118,42
TPES/pib	147	0,13	0,032	0,08	0,22
ELEC/pib	147	0,28	0,11	0,12	0,55

3. Modèles (2) et (3) avec les valeurs des effets fixes u_i pour chaque pays du panel. Données utilisées pour l'estimation des émissions contrefactuelles.

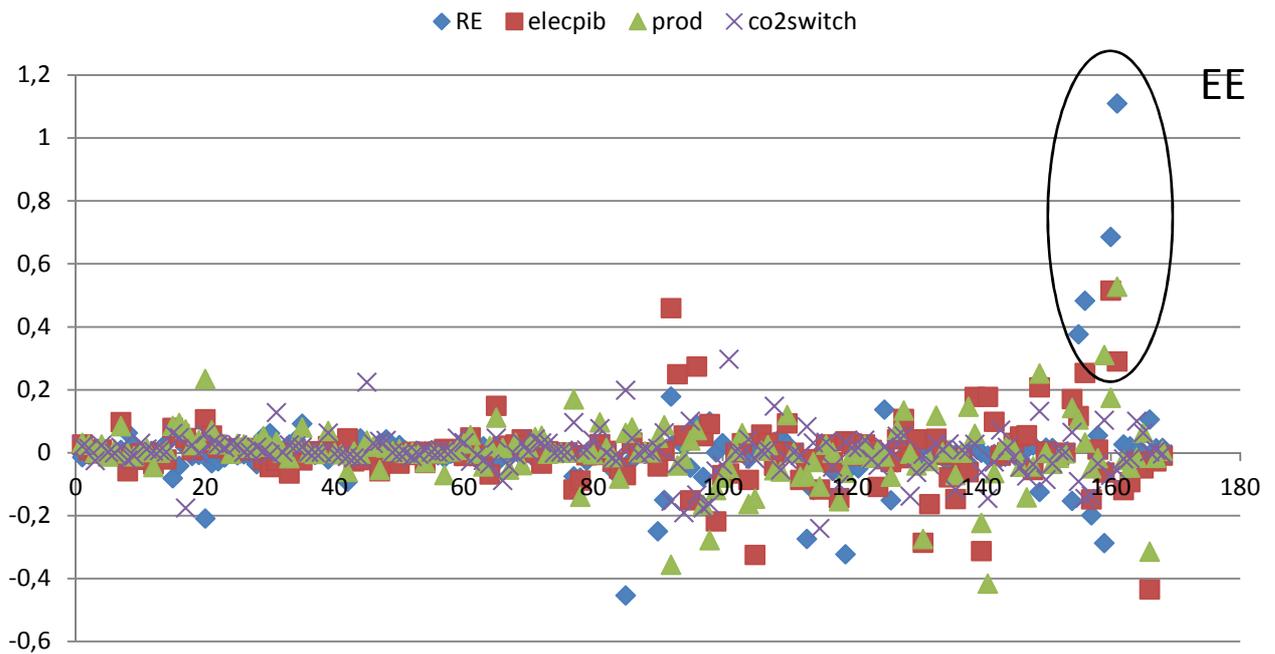
Modèle	(2)		(3)		Pays
	Coefficient	Err. standard	Coefficient	Err. standard	
$prctRE_{it}$	-0.1746 ***	0.04216	-0.1249 ***	0.04269	-
$prodM_{it}$	0.4314 ***	0.10522	0.5001 ***	0.6890	-
$ratioGC_{it}$	0.0607 *	0.03141	-	-	-
$CO2switch_{it}$	-0.00589	0.00626	-0.00386	0.03987	-
$TPES_{it}$	-	-	0.7488 ***	0.1776	-
$ELEC_{it}$	0.3684	0.2348	-	-	-
u_2	0.6263	0.0119	0.6496	0.0101	Allemagne
u_3	0.1434	0.0119	0.2099	0.0157	Espagne
u_4	0.2917	0.0184	0.3434	0.0195	Italie
u_5	0.0916	0.0590	0.1647	0.0192	Pologne
u_6	0.3276	0.0486	0.3911	0.0387	Royaume-Uni
u_7	-0.1530	0.0329	-0.1635	0.140	Pays-Bas
u_8	-0.3355	0.0759	-0.2959	0.0202	Rep. Tchèque
u_{10}	-0.4464	0.0297	-0.4252	0.0256	Autriche
u_{11}	-0.5449	0.0772	-0.5946	0.0448	Finlande
u_{12}	-0.2911	0.0120	-0.1840	0.0238	Grèce
u_{13}	-0.8124	0.0467	-0.7499	0.0156	Hongrie
u_{14}	-0.5656	0.0291	-0.4754	0.0184	Portugal
u_{16}	-0.7459	0.0656	-0.7516	0.0367	Suède
u_{18}	-0.6929	0.0632	-0.6205	0.0426	Irlande
u_{19}	-1.4382	0.0594	-1.13747	0.0153	Lituanie
u_{20}	-1.7880	0.0358	-1.7459	0.0336	Luxembourg
u_{21}	-1.6158	0.0751	-1.5543	0.0247	Lettonie
u_{22}	-0.7791	0.0889	-0.7306	0.0223	Slovaquie
u_{23}	-0.5145	0.0501	-0.5218	0.0190	Danemark
u_{25}	-1.1554	0.0584	-1.1094	0.0170	Slovénie
<i>Intercept</i>	0.7661	0.4543	0.03544	0.335	France (Ref.)

Nombre d'observation = 147, nombre de groupes = 21

Notes : *** indique une variable significativement différente de zéro au seuil de 1%, ** au seuil de 5% et * à 10 %

Le pays de référence (u_1) est la France, les autres u_i sont donc donnés en écart à cette référence. Tous les estimateurs des u_i sont significatifs au seuil de 1% (sauf u_5 et la constante qui le sont à 10% pour le modèle (2) et la constante dans le modèle (3) qui n'est significative qu'au seuil de 29%)

4. Analyse DFBETA sur le modèle (2)



L'analyse DFBETA montre l'effet perturbateur des observations pour l'Estonie sur l'estimation des coefficients de la régression. Afin d'améliorer la précision du modèle, il a été choisi de retirer ce pays du panel.

5. Test de Hausman réalisé sur le modèle (1) avec la variable TPES/PIB

Test hypothèse H_0 (différence entre les coefficients RE et Fen non systématique)

Chi 2 = 10,53

Prob > Chi2 = 16,06%

Probabilité plus grande que 5 % et autorise donc a priori l'utilisation d'une régression avec effets aléatoires (au seuil de risque de 5 % et même 10 %)

6. Test d'autocorrélation des erreurs

La présence d'autocorrélation des erreurs a été testée en ajoutant dans la régression à t le résidu estimé de la période t-1 (variable lag_residu).

Modèle	(1 avec ELEC)			(1 avec TPES)		
	Coefficient	Err. standard	P> t	Coefficient	Err. standard	P> t
<i>prctRE_{it}</i>	-0.0965	0.0587	0.115	-0.0668	0.0569	0.253
<i>prodM_{it}</i>	0.409	0.0972	0.00	0.445	0.0748	0.00
<i>ratioGC_{it}</i>	0.0880	0.0288	0.006	0.037	0.0351	0.301
<i>ELEC_{it}</i>	0.605	0.226	0.014	-	-	-
<i>TPES</i>	-	-	-	0.862	0.293	0.008
<i>CO2switch_{it}</i>	-0.0115	0.00639	0.085	-0.00827	0.00528	0.132
<i>Lag_residu_{it-1}</i>	0.186	0.189	0.336	0.0994	0.139	0.481
<i>Intercept</i>	-0.477	0.627	0.455	-0.425	0.545	0.443

7. Test d'hétéroscédasticité réalisé sur le modèle (1)

Le test déployé est celui proposé par Wingins et Poi⁵⁵. L'hypothèse Ho testée est celle de l'homoscédasticité

LR Chi2 = 229,54

Prob > LR Chi2 = 0,0 %

Rejet de l'hypothèse Ho d'homoscédasticité

⁵⁵ Vince Wiggins et Brian Poi (StataCorp) Testing for panel-level heteroskedasticity and autocorrelation, juin 2001, révisé en décembre 2003. www.stata.com/support/faqs/statistics/panel-level-heteroskedasticity-and-autocorrelation/

8. Régressions des modèles (2) et (3) en excluant la variable PIB non significative

Tableau 3

Modèle	(2)			(3)		
	Coefficient	Err. standard	P> t	Coefficient	Err. standard	P> t
<i>PIB_{it}</i>	-	-	-	-	-	-
<i>prctRE_{it}</i>	-0.1746 ***	0.04216	0.001	-0.1249 ***	0.04269	0.008
<i>prodM_{it}</i>	0.4314 ***	0.10522	0.001	0.5001 ***	0.6890	0.000
<i>ratioGC_{it}</i>	0.0607 *	0.03141	0.067	-	-	-
<i>CO2switch_{it}</i>	-0.00589	0.00626	0.358	-0.00386	0.03987	0.344
<i>TPES_{it}</i>	-	-	-	0.7488 ***	0.1776	0.000
<i>ELEC_{it}</i>	0.3684	0.2348	0.132	-	-	-
<i>Intercept</i>	0.2709	0.4351	0.54	-0.0998	0.3069	0.748

Nombre d'observation = 147, nombre de groupes = 21

Notes : *** indique une variable significativement différente de zéro au seuil de 1%, ** au seuil de 5% et * au seuil de 10%

Pour le modèle (2) : test de nullité jointe des variables F(7,22) = 17,43

Prob > F = 0,00%

Pour le modèle (3) : test de nullité jointe des variables F(7,22) = 26,29

Prob > F = 0,00%

9. Prédictions des modèles issus de l'analyse économétrique et écarts aux observations. Les valeurs sont en MtCO₂

	Modèle (2) ⁵⁶		Modèle (3) ⁵⁷		Observations
	Prédiction	Ecart aux obs.	Prédiction	Ecart aux obs.	
2005	1 975	1,9 %	1 982	2,2 %	1 939
2006	1 992	1,5 %	1 982	1,0 %	1 962
2007	1 958	-1,1 %	1 970	-0,5 %	1 980
2008	1 881	-2,1 %	1 894	-1,4 %	1 921
2009	1 700	-0,9%	1 699	-0,9 %	1 715
2010	1 738	-1,6 %	1 763	-0,2 %	1 767
2011	1 735	0,5 %	1 714	-0,7 %	1 726
Ecart cumulé⁵⁸	184	-	134	-	-

⁵⁶ Modèle avec la variable consommation d'électricité par point de PIB (variable ELEC)

⁵⁷ Modèle avec la variable consommation totale d'énergie primaire par point de PIB (variable TPES)

⁵⁸ Somme des valeurs absolues des écarts entre le volume des émissions prédites par le modèle et les émissions observées.

10. Estimation de l'origine des abattements par rapport au scénario AFE

Les abattements sont calculés par rapport aux émissions prédites par le modèle à partir des données observées sur le période 2005-11. CF indique que pour cette variable seulement, ce sont les données contrefactuelles estimées sous les hypothèses du scénario AFE qui sont utilisées. Pour toutes les autres variables, ce sont les données observées qui sont utilisées.

Modèle (2)

	Prédiction	% EnR (CF)	Prod. M (CF)	ELEC/PIB (CF)	CO2/switch (CF)	Ratio G/C (CF)	Cumul
2005	1 975	10	42	2	7	0	60
2006	1 992	36	3	13	4	-3	52
2007	1 958	56	-29	29	-32	85	109
2008	1 881	83	-2	28	7	59	175
2009	1 700	125	126	27	-2	46	321
2010	1 738	153	89	13	2	39	295
2011	1 735	182	68	25	1	36	312
Cumul	-	643	296	136	-13 *	262	1 324
%	-	48,6	22,4	10,3	-1,0	19,8	100

* Pour le modèle (2), l'erreur est estimée à ± 90 Mt. En conséquence, l'abattement évalué pour la variable *prix du CO2/prix du switch* n'est pas significativement différente de zéro (conforme aux résultats économétrique).

Modèle (3)

	Prédiction	% EnR (CF)	Prod. M (CF)	TPES/PIB (CF)	CO2/switch (CF)	Ratio G/C (CF)	Cumul
2005	1 982	6	49	-10	23	-	68
2006	1 982	25	3	14	22	-	65
2007	1 970	40	-34	65	-3	-	68
2008	1 894	59	-3	58	23	-	138
2009	1 699	88	147	50	16	-	300
2010	1 763	109	105	5	18	-	236
2011	1 714	126	79	54	17	-	275
Cumul	-	454	346	235	116	-	1 151
%	-	39,5	30,0	20,4	10,1	-	100

Pour le modèle (3), l'erreur est estimée à ± 65 Mt.