

Prix du carbone et compétitivité ⁽¹⁾

Par **Fabrice DAMBRINE**

Ingénieur général des mines, conseiller d'État en service extraordinaire et président de la section « Innovation, compétitivité et modernisation » au Conseil général de l'Économie

et **François VALÉRIAN**

Ingénieur général des mines, rédacteur en chef des Annales des Mines et professeur associé de finance au Conservatoire national des Arts et Métiers

La France est en Europe, derrière le Luxembourg, le pays dont les émissions de CO₂ d'origine énergétique et industrielle rapportées au PIB sont les plus faibles. Or, un prélèvement financier sur les émissions carbonées diminue à la fois le profit et la production du secteur carboné impacté, ces effets étant d'autant plus marqués que l'accroissement du prélèvement et le degré de carbonation du secteur sont importants. L'exposition du secteur à la concurrence internationale amplifie ces effets tout en réduisant l'impact sur la réduction des émissions carbonées, cet impact pouvant même s'annuler ou s'inverser si les secteurs des pays dont proviennent les importations sont davantage carbonés. Si toutefois des prélèvements sur les émissions carbonées sont décidés pour satisfaire à des objectifs environnementaux, il convient alors de réinvestir dans l'économie l'intégralité des sommes prélevées afin de limiter les effets négatifs des prélèvements.

L'expression « prix du carbone » est trompeuse, car il s'agit en réalité d'un montant à acquitter pour avoir le droit d'émettre dans l'atmosphère du dioxyde de carbone ou d'autres gaz à effet de serre. Il est donc plus proche d'un prélèvement décidé par la puissance publique que du prix que l'on paie pour acquérir un bien.

Le sujet du prix du carbone suscite depuis plusieurs années des débats importants, les partisans d'un prix élevé y voyant le moyen principal de réduire des émissions qui, selon la communauté scientifique, sont la cause principale du changement climatique.

Il importe donc de réfléchir à l'impact économique des prélèvements opérés sur les émissions carbonées. Les économies des pays européens ne sont pas toutes dans la même situation par rapport aux émissions carbonées ; l'économie française, peu carbonée en termes relatifs, court néanmoins un risque de compétitivité, si des prélèvements carbone y sont décidés sans coordination avec les pays voisins. De plus, le réinvestissement des sommes prélevées dans l'économie est de première importance.

Les émissions carbonées et l'économie des pays

Le marché européen des émissions et les différents pays participants

Les secteurs couverts par le marché européen *Emissions Trading System* (ETS), dénommés ci-après « secteurs couverts », ont émis 1 776 Mt CO₂ éq. ⁽²⁾ en 2015, soit environ 45 % du total des émissions des 31 pays partici-

pants (UE 28 + Islande, Liechtenstein et Norvège). Il existe cependant une grande disparité dans les contributions des pays et des secteurs économiques aux émissions, comme l'illustrent les Figures 1 à 4.

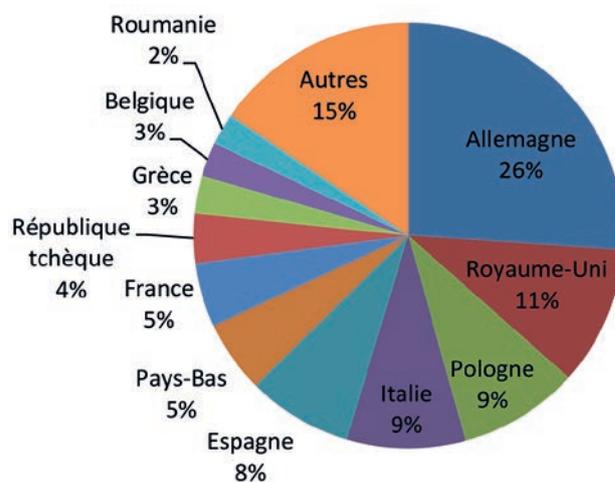


Figure 1 : Contributions des pays aux émissions vérifiées en 2015 dans les secteurs couverts par le marché européen des ETS. Sources : Agence européenne de l'Environnement, calculs auteurs.

(1) L'article présente les travaux réalisés par ses auteurs dans le cadre d'une mission confiée en 2016 par la ministre de l'Environnement à Messieurs Canfin, Grandjean et Mestrallet sur le prix du carbone. Une version résumée de ces travaux a été publiée en annexe du rapport de cette mission. Le présent article n'engage toutefois que ses auteurs.

(2) Les gaz couverts sont les suivants : le CO₂ de la combustion, des industries et de l'aviation, le N₂O de la chimie et les perfluorocarbones de la production d'aluminium.

2015 Emissions vérifiées en Mt CO ₂ eq.	Aviation	Combustion	Raffinage + coke	Métallurgie	Minéraux non métalliques (incl. ciment et chaux)	Papier	Chimie	Autres activités sous art. 24	Total	%
Autriche	1,005	7,514	2,804	12,174	4,238	1,644	1,004	0,114	30,497	1,72%
Belgique	1,272	20,341	10,255	1,355	7,455	0,784	4,440	0,074	45,978	2,59%
Bulgarie	0,262	17,070	0,007	0,054	1,796	0,094	0,000	0,000	19,281	1,09%
Croatie	0,154	3,270	1,320	0,023	2,255	0,457	1,519	0,000	8,998	0,51%
Chypre	0,003	3,023	0,000	0,000	1,346	0,000	0,000	0,000	4,372	0,25%
République tchèque	0,423	53,279	1,028	5,837	4,666	0,019	1,281	0,062	66,595	3,75%
Danemark	0,532	12,757	0,991	0,000	2,034	0,013	0,000	0,000	16,327	0,92%
Estonie	0,073	10,764	0,626	0,000	0,458	0,047	0,000	0,000	11,968	0,67%
Finlande	0,952	12,751	2,913	4,866	1,406	2,568	0,943	0,041	26,439	1,49%
France	3,873	38,619	10,179	12,206	15,048	2,055	4,975	0,000	86,955	4,90%
Allemagne	8,912	333,376	27,385	35,905	34,695	5,587	17,504	0,000	463,365	26,09%
Grèce	0,934	36,819	5,517	1,056	6,093	0,109	0,282	0,000	50,810	2,86%
Hongrie	0,000	11,317	0,022	6,450	1,226	0,230	0,239	0,000	19,483	1,10%
Islande	0,548	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,811	2,360	0,13%
Irlande	8,525	13,601	0,358	0,000	2,874	0,000	0,000	0,000	25,359	1,43%
Italie	1,976	95,413	18,989	11,177	20,426	4,000	5,690	0,453	158,125	8,90%
Lettonie	0,011	1,218	0,000	0,023	0,750	0,000	0,002	0,040	2,044	0,12%
Lithuanie	0,055	1,277	1,756	0,000	1,010	0,030	2,772	0,000	6,900	0,39%
Luxembourg	0,239	0,419	0,000	0,472	0,770	0,000	0,000	0,000	1,900	0,11%
Malte	0,245	0,890	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,135	0,06%
Pays-Bas	2,334	64,047	11,229	6,503	1,700	1,054	9,637	0,000	96,503	5,43%
Norvège	2,247	14,246	0,328	4,877	1,597	0,147	2,069	0,000	25,512	1,44%
Pologne	0,216	136,257	2,641	5,863	10,144	1,418	5,382	0,000	161,921	9,12%
Portugal	1,275	16,819	2,547	0,191	2,854	0,473	0,091	0,000	24,251	1,37%
Roumanie	0,571	33,699	1,201	0,880	6,218	0,122	0,272	0,000	42,963	2,42%
Slovaquie	0,021	14,519	1,146	0,658	3,287	0,131	1,440	0,000	21,203	1,19%
Slovénie	0,088	4,653	0,000	0,422	0,740	0,294	0,000	0,000	6,197	0,35%
Espagne	4,102	80,814	14,379	10,341	22,193	3,003	6,542	0,000	141,374	7,96%
Suède	2,786	4,533	2,865	5,290	3,337	0,644	0,853	0,061	20,370	1,15%
Royaume-Uni	10,978	127,501	16,433	12,610	11,842	1,483	5,642	0,271	186,761	10,52%
Total	54,613	1170,805	136,922	139,231	172,459	26,406	72,579	2,927	1775,943	100,00%
%	3,08%	65,93%	7,71%	7,84%	9,71%	1,49%	4,09%	0,16%	100,00%	

Figure 2 : Contributions des pays et des secteurs économiques aux émissions réelles vérifiées en 2015 dans les secteurs couverts par le marché européen des ETS.

Sources : Agence européenne de l'Environnement, calculs auteurs.

Note : La combustion recouvre, selon le texte de l'AEE, les centrales électriques et à chaleur « de plus de 20 MW », à l'exception des centrales municipales et des stations d'incinération de déchets dangereux. Au titre de l'aviation, on attribue à chaque pays toutes les émissions des opérateurs aériens auxquels il a accordé une licence et les émissions des opérateurs non européens qui attribuent au pays considéré la plus grande partie de leurs émissions européennes. Les émissions du Liechtenstein sont comptabilisées à zéro en 2015.

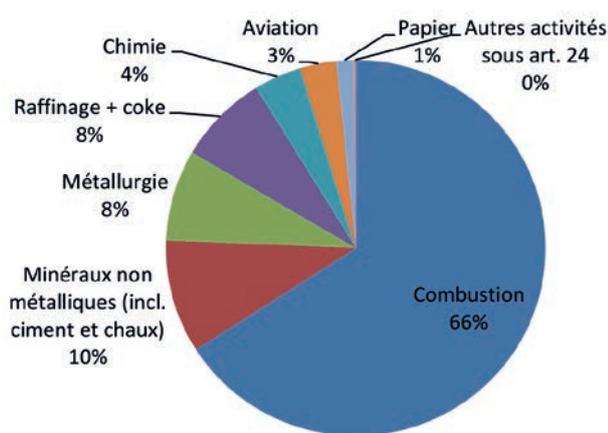


Figure 3 : Contributions des secteurs couverts par le marché européen des ETS aux émissions vérifiées en 2015.

Sources : Agence européenne de l'Environnement, calculs auteurs.

Situations relatives des pays par rapport aux émissions de CO₂ eq. dans les secteurs couverts

La situation est très différente d'un pays à l'autre du fait de deux facteurs :

- le poids des secteurs couverts dans le PIB du pays considéré ;
- le degré de carbonation⁽³⁾ des secteurs couverts dans le pays considéré.

Les Figures 6 et 7 illustrent cette diversité des situations nationales dans les principaux pays de l'ETS européen et les faibles émissions françaises par rapport à celles des autres pays.

Si l'on regarde plus en détail la situation française, on voit que les secteurs industriels couverts sont, à l'exception de la chimie et, dans une certaine mesure, de la combustion, stagnants ou déclinants en termes de chiffres d'affaires, et très exposés à la concurrence internationale (voir la Figure 5).

(3) Nous entendons par carbonation les émissions de CO₂ eq. rapportées au PIB dans le cas d'un pays ou d'un secteur, ou à une production particulière en volume plus loin dans le texte.

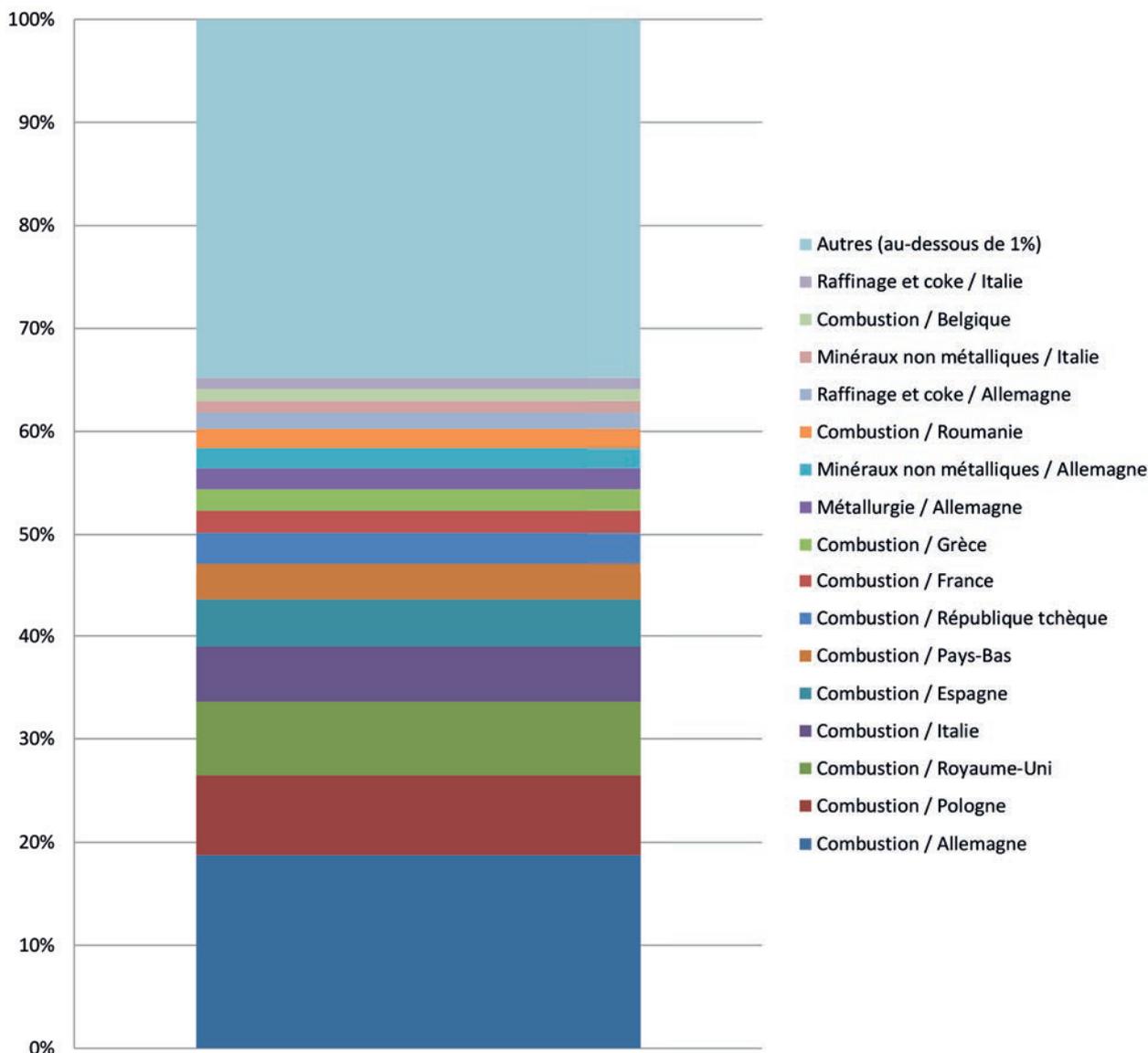


Figure 4 : Contributions des secteurs nationaux couverts par le marché européen des ETS aux émissions vérifiées en 2015. Sources : Agence Européenne de l'Environnement, calculs auteurs.

Secteur	TCAM 06-13 du PIB sectoriel	Degré d'ouverture internationale	kg CO ₂ émis par PIB sectoriel
Combustion	0,4%	3%	1,2
Raffinage + coke	0,0%	88%	5,4
Métallurgie	-0,9%	83%	0,5
Minéraux non métalliques (incl. ciment et chaux)	-1,2%	76%	2,0
Papier	-1,3%	56%	0,5
Chimie	2,4%	142%	0,3

Figure 5 : France, secteurs couverts (hors aviation) : taux de croissance annuel moyen 2006-2013, degré d'ouverture internationale (exportations+importations)/production domestique, taux d'émissions. Sources : Agence européenne de l'Environnement, Eurostat, KOLÉDA (Gilles), « Allègements du coût du travail : pour une voie favorable à la compétitivité française », La Fabrique de l'Industrie, 2015, calculs auteurs.

Les effets d'un prélèvement carbone accru sur la compétitivité économique

La modélisation des effets

Nous analysons dans cette partie, au travers de modèles simples, les effets d'un prélèvement carbone accru sur un secteur carboné industriel ou sur le secteur électrique.

Impact économique d'une taxe carbone ou du renchérissement de la tonne de carbone sur un secteur carboné industriel

L'analyse qui suit consiste en une modélisation de l'impact économique d'une taxe carbone ou d'un renchérissement de la tonne de carbone sur un secteur industriel, dont la production engendre des émissions carbonées.

On suppose un secteur à un seul produit (par exemple, de l'acier ou du ciment), avec une fonction de demande en

Degré de carbonation des secteurs couverts
(kg de CO₂ éq. émis par € de PIB des secteurs couverts)

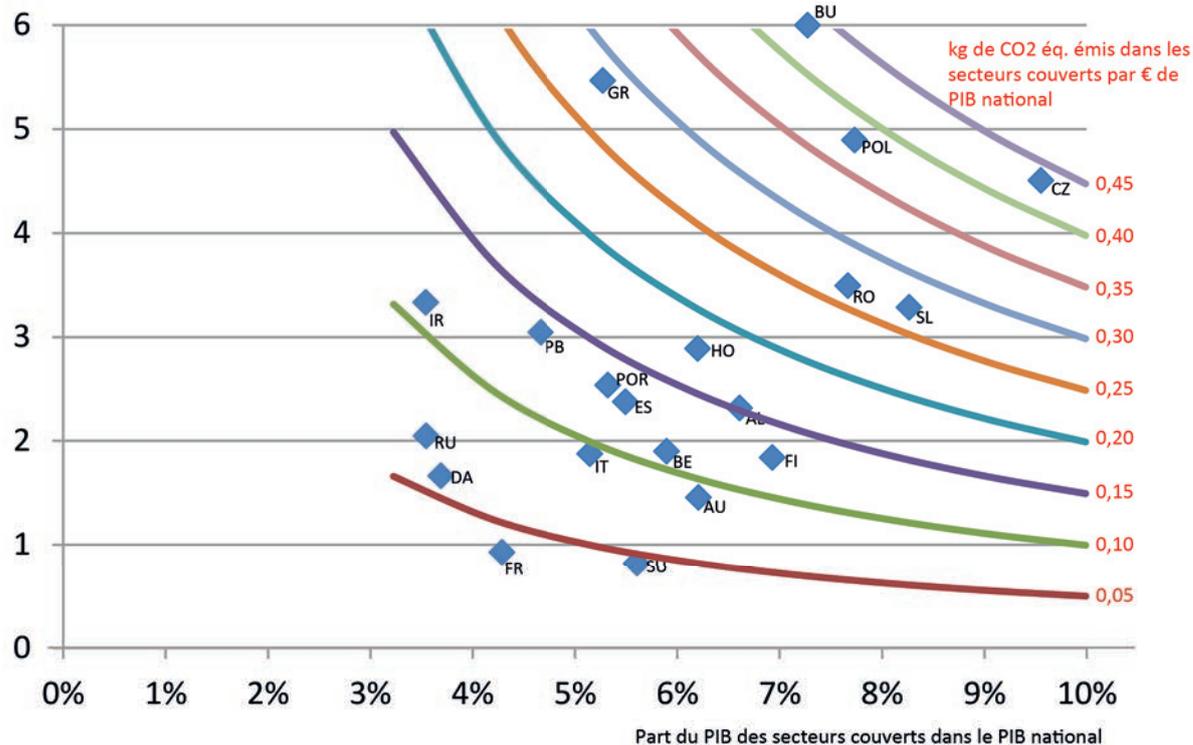


Figure 6 : Degré de carbonation des secteurs couverts, part des secteurs couverts dans le PIB national et émissions des secteurs couverts rapportées au PIB dans les principaux pays du marché ETS européen.

Sources : Agence européenne de l'Environnement, Eurostat, calculs auteurs.

Note : L'ordonnée « y » représente, pour l'ensemble des secteurs couverts, le rapport de leurs émissions de CO₂ éq. sur leur PIB sectoriel, exprimé en kg CO₂ éq./€ ($y = \text{Émissions}_{SC} / \text{PIB}_{SC}$) ; l'abscisse « x » représente le rapport du PIB des secteurs couverts sur le PIB national total ($x = \text{PIB}_{SC} / \text{PIB}_{\text{total}}$). Par exemple, pour la France, le PIB des secteurs couverts représente 4,3 % du PIB national (soit environ 90 Mds euros pour un PIB annuel d'environ 2 100 Mds d'euros), et leur intensité carbone est d'un peu plus de 0,9 kg éq. CO₂/€ de leur propre PIB.

Le produit xy représente donc le rapport des émissions des secteurs couverts sur le PIB national en kg CO₂ éq./€. Chaque courbe réunit les points pour lesquels ce rapport est constant et égal à q kg/€ (l'équation de la courbe est donc $xy = q$).

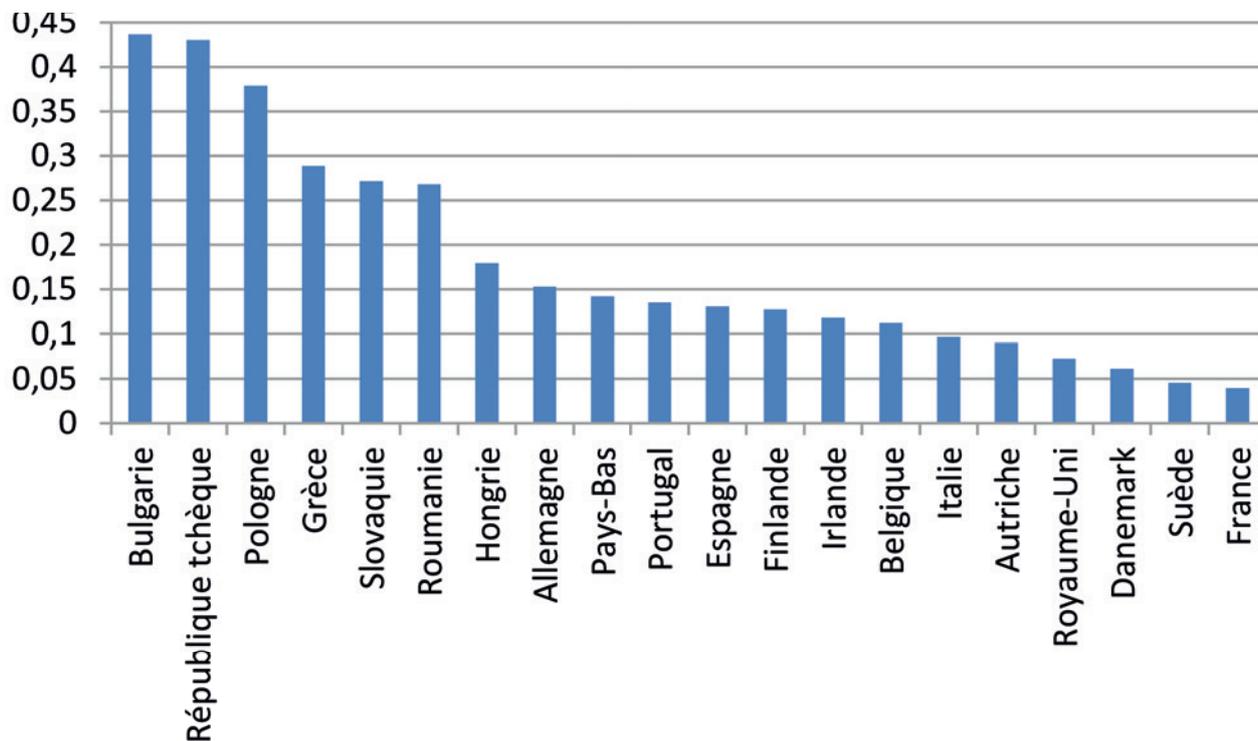


Figure 7 : Émissions des secteurs couverts en kg de CO₂ par euros de PIB dans les principaux pays du marché ETS européen.

Sources : Agence européenne de l'Environnement, Eurostat, calculs auteurs.

décroissance linéaire par rapport au prix et une fonction de coût des entreprises avec coûts fixes et coûts variables d'ordre 1⁽⁴⁾.

État 0 / Secteur sans prélèvement carbone et à l'abri des importations

- La courbe prix/demande $p(q)$ du produit, avec p le prix du marché et q la quantité demandée/vendue, est linéaire : $p(q) = a - bq$;
- le coût de production d'une quantité q est $c(q) = c_f + c_m q$ (c_f coût fixe et c_m coût marginal de production).

On suppose que le secteur compte un seul producteur. La maximisation du profit du producteur $p(q)q - c(q)$ se fait si et seulement si $qdp/dq + p - c_m = 0$ (annulation de la dérivée du profit exprimé en fonction des quantités vendues) :

Soit $a - c_m - 2bq = 0$, ce qui donne⁽⁵⁾ :

$$q_0 = \frac{(a - c_m)}{2b} \text{ et } p_0 = \frac{(a + c_m)}{2}$$

Le profit ainsi maximisé Π_0 est égal à $p_0 q_0 - c_m q_0 - c_f$, soit :

$$\Pi_0 = \frac{(a - c_m)^2}{4b} - c_f$$

Si λ est le degré de carbonation du secteur, λ étant défini comme le nombre de tonnes de CO_2 éq. émises par unité de produit, le total des émissions du secteur dans l'état 0 est de :

$$E_0 = \lambda q_0 = \frac{\lambda (a - c_m)}{2b}$$

État 1 / Secteur avec prélèvement carbone et à l'abri des importations

On introduit un prélèvement carbone, dont le montant global est $e q$, e étant le prélèvement carbone par unité de volume produit, qui dépend du montant du prélèvement par tonne de CO_2 émise et du degré λ de carbonation du secteur selon la relation :

$$e = \tau \lambda$$

Le coût marginal de production passe donc de c_m à $c_m + e$ et l'on obtient en maximisant à nouveau le profit du producteur une production moindre, un prix plus élevé et un profit moindre que dans l'état 0.

$$q_1 = \frac{a - c_m - e}{2b} \text{ avec } \Delta q = \frac{(-e)}{2b}$$

$$p_1 = \frac{(a + c_m + e)}{2}$$

$$\Pi_1 = \frac{(a - c_m - e)^2}{4b} - c_f$$

La variation négative de profit est alors égale à :

$$\Pi_1 - \Pi_0 = \frac{-e(2a - 2c_m - e)}{4b} \text{ négatif et d'autant plus grand en valeur absolue que } e \text{ est élevé (} e \text{ reste inférieur à } a - c_m \text{, faute de quoi il n'y aurait aucun intérêt à produire, le coût marginal de production devenant supérieur au prix de vente).}$$

Le prélèvement carbone permet de réduire les émissions, la variation négative des émissions étant de :

$$\Delta E = E_1 - E_0 = \lambda(q_1 - q_0) = \frac{-\lambda e}{2b} = \frac{-\lambda^2 \tau}{2b}$$

$$\text{Avec } E_1 = \frac{\lambda(a - c_m - \lambda \tau)}{2b}$$

On peut donc conclure de l'état 1 les points suivants :

- la diminution de profit est d'autant plus grande que le taux de prélèvement à la tonne de CO_2 est élevé ;
- la diminution de profit est d'autant plus grande que le degré de carbonation du secteur est important ;
- la diminution de production est d'autant plus grande que le taux de prélèvement à la tonne de CO_2 est élevé ;
- la diminution de production est d'autant plus grande que le degré de carbonation du secteur est important ;
- la réduction des émissions est proportionnelle au taux de prélèvement à la tonne de CO_2 et au carré du taux de carbonation du secteur (le taux de carbonation a un double effet, à la fois sur les émissions évitées par unité de produit et sur la diminution de la production).
- enfin, tous ces effets sont d'autant plus élevés que la sensibilité de la demande au prix est forte (b faible).

État 2 / Secteur avec prélèvement carbone et exposé aux importations

On suppose désormais que la hausse des prix provoquée par le prélèvement carbone permet à des importateurs, au-dessus d'un certain prix p_i tel que p_i est supérieur à p_0 , mais inférieur à p_1 , de prendre une part de marché ρ qui est une fraction du marché total.

$$\text{On a donc } \frac{(a + c_m)}{2} < p_i < \frac{a + c_m + e}{2}$$

On suppose que les importateurs sont dans une perspective de conquête du marché et donc qu'ils n'optimisent pas leur profit, mais s'emparent de la part de marché ρ dès que le prix de marché atteint p_i qui est égal à leur coût marginal de production. Le prix du marché reste alors égal à p_i et s'impose aux producteurs domestiques comme une variable exogène. De ce fait, ils ne peuvent non plus jouer sur la quantité et prennent ce que leur laissent les importateurs. On a donc :

$$p_i = a - bq, \text{ avec } q = q_2 + q_i, \text{ où } q_2 \text{ est la production domestique dans l'état 2 et est égale à } (1 - \rho)q$$

$$q_2 = \frac{(1 - \rho)(a - p_i)}{b}$$

$$\Pi_2 = \frac{(p_i - c_m - e)(1 - \rho)(a - p_i)}{b} - c_f \text{ et est inférieur à } \Pi_1 \text{ qui maximise } \frac{(p_i - c_m - e)(1 - \rho)(a - p_i)}{b} - c_f \text{ en fonction de } p_i$$

Π_2 est d'autant plus faible que la pénétration ρ est importante. Il est d'autant plus faible que le prix p_i , auquel se font les importations est peu élevé (cas d'un secteur de commodités très exposé à la concurrence internationale). Les émissions domestiques dans l'état 2 sont $E_2 = \lambda_d \frac{(1 - \rho)(a - p_i)}{b}$, où λ_d est le taux de carbonation des producteurs domestiques.

(4) Supposer un terme d'ordre 2 dans la fonction de coût ne changerait pas les conclusions, mais alourdirait les calculs.

(5) a est supérieur à c_m , faute de quoi il n'y aurait pas de production.

La variation négative des émissions domestiques entre l'état 0 et l'état 2 est de :

$$\Delta E = E_2 - E_0 = \frac{\lambda_d(1-\rho)(a-p_i)}{b} - \frac{\lambda_d(a-c_m)}{2b} = \frac{\lambda_d[a+c_m-2p_i-2\rho(a-p_i)]}{2b}$$

négatif car $p_i > p_0 = \frac{a+c_m}{2}$

Cette variation négative s'accompagne cependant d'une variation positive des émissions liées aux importations. Ces émissions sont égales à :

$$\Delta E_i = \frac{\lambda_i \rho (a-p_i)}{b}, \text{ où } \lambda_i \text{ est le taux de carbonation des importateurs.}$$

On peut ainsi définir entre l'état 0 et l'état 2 un taux de fuite carbone

$$F_{2/0} = - \frac{\text{(émissions produites par la hausse des importations)}}{\text{(émissions évitées par la baisse de la production domestique)}} \\ = \frac{-2\lambda_i \rho (a-p_i)}{\lambda_d [a+c_m-2p_i-2\rho(a-p_i)]}$$

$F_{2/0}$ est d'autant plus grand que la pénétration ρ des importations est importante, et que le prix auquel elle se fait est faible.

$F_{2/0}$ est d'autant plus grand que le rapport λ_i/λ_d de la carbonation importée sur la carbonation domestique est important.

Si le taux de carbonation λ_i des produits importés est inférieur ou égal au taux de carbonation domestique λ_d , $F_{2/0}$ est toujours inférieur à 100 %.

Par contre, le taux de fuite peut être supérieur à 100 % si le taux de carbonation λ_i des produits importés est supérieur au taux de carbonation domestique λ_d .

On peut donc conclure de l'état 2 les points suivants :

- un accroissement des importations provoqué par un prélèvement carbone diminue le profit des producteurs domestiques ;
- la diminution de profit est d'autant plus importante que le secteur est exposé à la concurrence internationale, avec des importations potentiellement massives (part de marché) et aisées (faible barrière de prix) ;
- ces importations causent des fuites d'émissions carbonées, le taux de fuite étant d'autant plus important que les productions importées sont carbonées par rapport aux productions domestiques, et que la pénétration des importations est massive et aisée.

Enfin, comme on le voit dans l'état 1, la possibilité pour les entreprises de transférer sur leurs clients une partie significative du prélèvement carbone ne signifie pas que leurs volumes et leurs profits sont inchangés, ni que les marges ou le pouvoir d'achat des clients ne sont pas impactés par la hausse du prix.

Impact économique d'une taxe carbone ou du renchérissement de la tonne de carbone sur le secteur électrique

L'introduction d'un prélèvement carbone sur le secteur électrique présente une problématique analogue à celle exposée plus haut. Le prélèvement carbone pourrait

changer l'ordre de marginalité des différents types de centrale et diminuer ainsi les émissions carbonées, mais le niveau de prélèvement nécessaire dépend des prix très variables des combustibles. L'effet de hausse des prix sur la demande d'électricité contribue aussi à cette diminution des émissions carbonées. Cependant, la hausse des coûts marginaux de production cause aussi un recours accru aux importations d'électricité, ce qui diminue la production domestique et suscite des fuites carbonées, d'autant plus fortes que l'électricité importée est plus carbonée que l'électricité domestique effacée.

On peut aussi envisager le prélèvement carbone comme un moyen de substituer à une production électrique par le charbon, très émettrice de CO_2 , une production par le gaz qui est moins émettrice, et l'on cite souvent ⁽⁶⁾ un niveau de prélèvement carbone de 30 euros par tonne comme permettant une substitution du gaz au charbon. Cette situation se vérifie depuis le début de 2016 du fait des niveaux absolus et relatifs des prix du gaz et du charbon, mais si l'on applique rétroactivement ce montant de prélèvement sur les séries de prix 2006-2016 des contrats futurs à un mois, on constate que pour réaliser cette substitution, il aurait fallu sur la période 2011-2015 un niveau de prélèvement sensiblement supérieur à 30 euros (voir la Figure 8), avec des effets encore plus importants sur le prix de l'électricité.

Ce résultat se vérifie pour des hypothèses différentes de rendement des centrales à gaz et au charbon, l'une favorable au charbon avec 50 % de rendement pour le gaz et 38 % de rendement pour le charbon, l'autre favorable au gaz avec 52 % de rendement pour le gaz et 36 % de rendement pour le charbon. Il s'explique par les évolutions absolues et relatives des prix du gaz et du charbon (voir la Figure 9), qui font varier considérablement le niveau de prélèvement assurant la neutralité entre gaz et charbon (voir la Figure 8).

Pour réaliser les graphiques correspondant aux figures 8 et 9 nous avons construit le modèle suivant.

Soit :

- r : rendement électrique de la centrale (MWh électriques produits/MWh thermiques consommés) ;
- C : facteur d'émission CO_2 (t CO_2 émises/MWh th) :
 - $C_{\text{charbon}} = 343 \text{ kg } CO_2/\text{MWh th}$,
 - $C_{\text{gaz}} = 206 \text{ kg } CO_2/\text{MWh th}$;
- P : prix du combustible (€/MWh) ;
- T : montant de la taxe carbone (€/t CO_2).

On appelle « neutralité carbone » le différentiel de prix, exprimé en €/MWh th, entre le prix du gaz (indice g) et celui du charbon (indice c) $\Delta P_{g/c}$, qui égalise les coûts variables (combustible+taxe carbone) correspondant à la production de 1 MWh él. ; autrement dit, le différentiel de prix qui rend indifférent la production soit à base de charbon, soit à base de gaz.

⁽⁶⁾ RTE, Signal prix du CO_2 , analyse de son impact sur le système électrique européen, 2016.

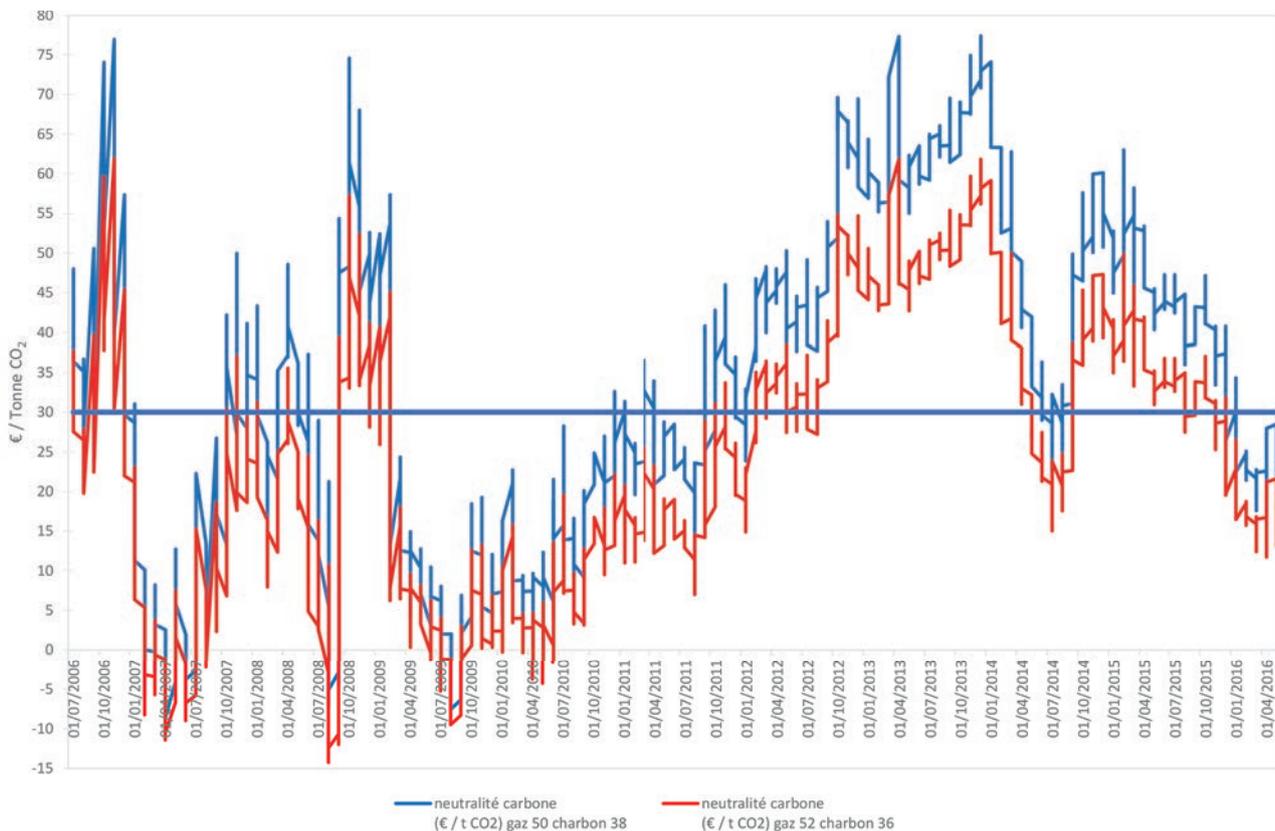


Figure 8 : Évolution du prélèvement carbone qui aurait assuré la neutralité entre gaz et charbon selon deux hypothèses de rendements des centrales (juillet 2006-mai 2016).

Source : *Modèle des auteurs. La production à partir de charbon est moins coûteuse que celle à partir de gaz quand le prélèvement carbone réel est au-dessous de la courbe de neutralité. Elle est plus coûteuse quand le prélèvement est au-dessus de la courbe.*

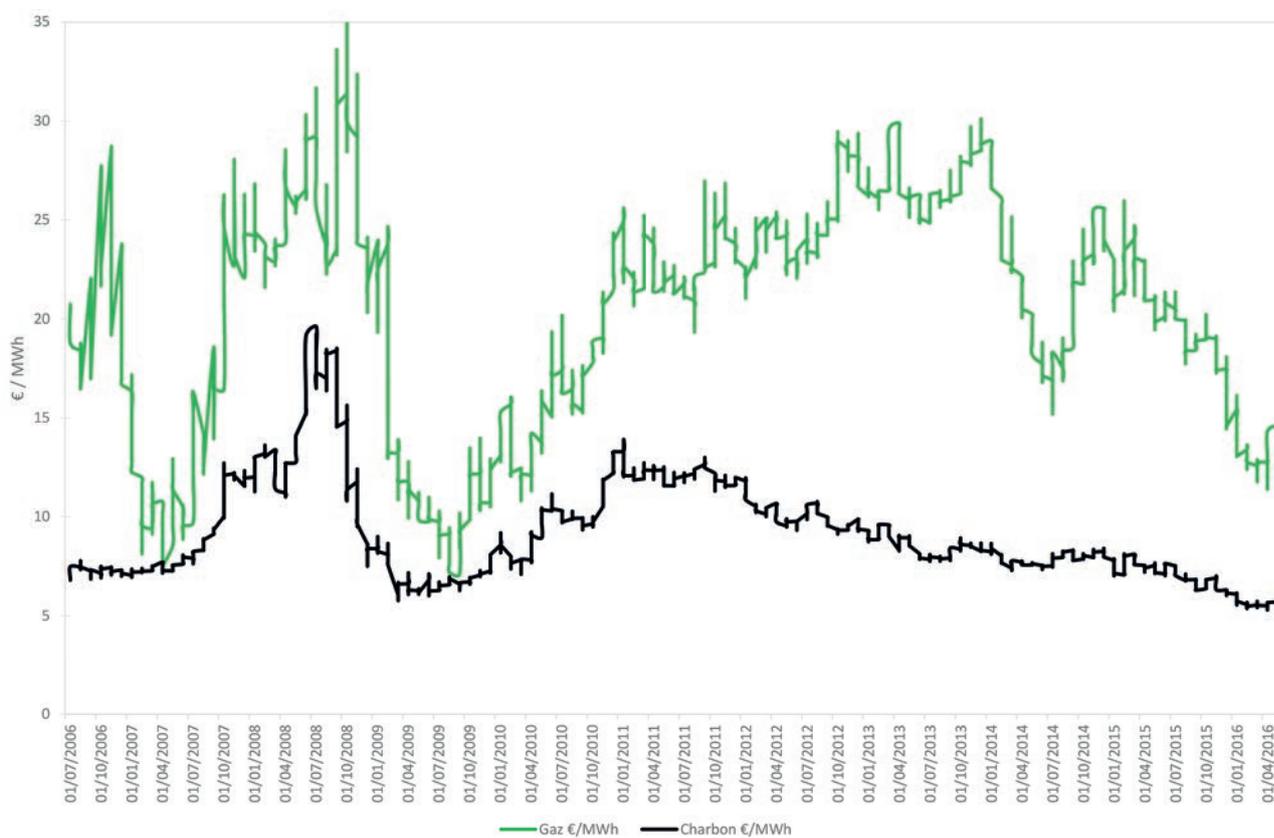


Figure 9 : Évolution des prix du gaz et du charbon en euros par MWh thermique (juillet 2006-mai 2016).

La condition de neutralité carbone correspond à :

$$\frac{1}{r_c} (P_c + T.C_c) = \frac{1}{r_g} (P_g + T.C_g)$$

Ce qui donne :

$$\Delta P_{g/c} = P_g - P_c = P_c \left(\frac{r_g}{r_c} - 1 \right) + T \frac{(r_g C_c - r_c C_g)}{r_c}$$

Ou également, $T = \frac{r_g P_c - r_c P_g}{r_c C_g - r_g C_c}$, T étant le montant de la taxe qui correspond à la neutralité carbone : utilisation économique indifférente en coûts variables d'une centrale à charbon ou d'une centrale à gaz.

Cette équation permet de tirer trois enseignements :

- à moins que les rendements des centrales à gaz et à charbon ne soient les mêmes ($r_c = r_g$), ce qui n'est pas le cas actuellement (actuellement avec les centrales les plus modernes, $r_g = 60\%$ et $r_c = 46\%$), et n'a techniquement aucune raison d'être le cas à l'avenir, le différentiel de prix correspondant à la neutralité carbone dépend du montant absolu du prix des combustibles ;
- la neutralité carbone ne peut donc être assurée qu'en ajustant en permanence le montant T de la taxe carbone aux prix du gaz et du charbon et non seulement à leur différentiel de prix (et en l'ajustant ainsi à la technique qui va imposer les rendements des centrales électriques) ;
- si le montant réel de la taxe carbone est supérieur au montant correspondant à la neutralité, il est plus intéressant d'utiliser des centrales à gaz. À l'inverse, si le montant de la taxe carbone est inférieur au montant d'équilibre, il est plus intéressant d'utiliser des centrales à charbon que des centrales à gaz.

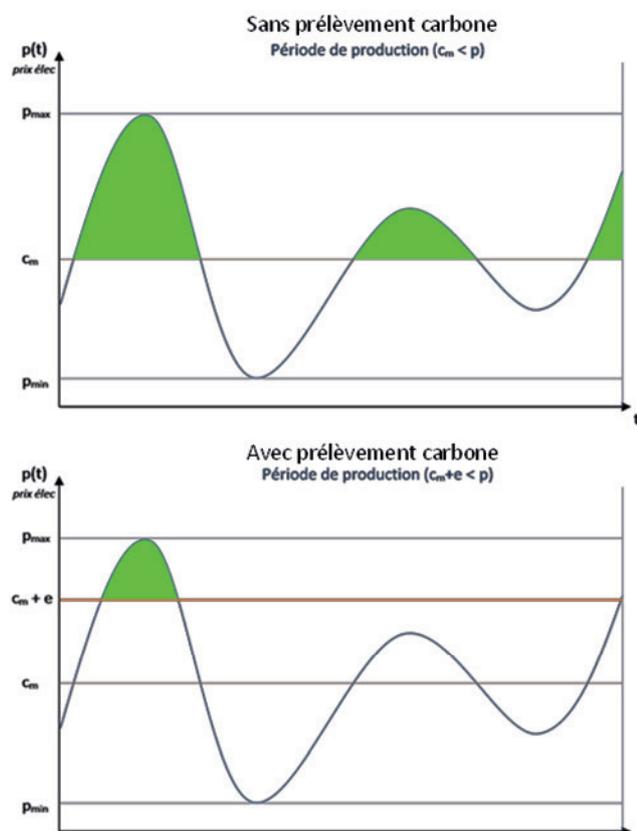


Figure 10 : Temps de fonctionnement d'une centrale avec ou sans prélèvement carbone, selon le prix de l'électricité.

Par ailleurs, le prélèvement carbone augmente le coût marginal des centrales et diminue donc leur temps de fonctionnement dans l'année, comme illustré par la Figure 10.

Les résultats des modèles : les effets sur la compétitivité, tels que mesurés par les études

Recensement d'études récentes

Nous avons effectué un recensement, non exhaustif, des études réalisées sur les cinq dernières années au sujet de l'impact des prélèvements carbone sur la compétitivité économique. Nous les avons classées par ordre croissant du taux analysé dans l'étude pour le prélèvement à la tonne de CO_2 , et nous avons indiqué, outre les années de publications et les références des auteurs, les pays concernés, les secteurs concernés et les principaux résultats. La plupart sont des études académiques, celles qui ne le sont pas, mais émanent de divers organismes privés ou publics, sont signalées par un astérisque à côté des références des auteurs (voir la Figure 11).

On peut classer ces études en deux grandes catégories :

- les études empiriques *ex post* dont la plupart portent sur le marché ETS dans les années passées (moyenne de 10 euros la tonne) et concluent presque toutes à un impact faible sur la compétitivité.
- les modélisations *ex ante* qui portent sur des prix plus élevés, à partir de 13 euros, et concluent généralement à un impact négatif plus important, dans des pays et des secteurs divers.

Les conséquences d'un prélèvement de 30 euros par tonne de CO_2 réalisé exclusivement sur la production électrique française

Un prélèvement de 30 euros par tonne de CO_2 réalisé exclusivement sur la production électrique française affaiblirait les productions électriques françaises charbonnière et gazière, diminuerait le solde exportateur électrique français, augmenterait marginalement le prix de l'électricité française et aurait un impact limité sur la réduction des émissions carbonées.

La chaire « Économie du climat » de l'Université Paris-Dauphine et de CDC Climat a étudié les conséquences d'un prélèvement de 30 euros par tonne de CO_2 réalisé exclusivement sur la production électrique française. Les principaux résultats de cette étude (7) sont en Figure 12. On y constate que les centrales au gaz sont encore plus touchées que celles au charbon, car la mesure ne modifie pas l'ordre d'appel entre les deux combustibles.

Un décalage très sensible entre les prix français et européen du carbone paraît donc devoir être évité.

Les conséquences d'un prélèvement de 30 euros par tonne de CO_2 réalisé sur la production électrique européenne

Cette même chaire « Économie du climat » a également simulé l'impact sur le secteur électrique français d'un

(7) PERTHUIS (Christian de), SOLIER (Boris) et TROTIGNON (Raphaël), Prix-plancher du carbone pour le secteur électrique : quelles conséquences sur les marchés de l'électricité et du quota de CO_2 ?, Université Paris-Dauphine, chaire « Économie du climat », 2016.

Prix de la tonne de CO ₂ éq.	Type d'étude	Année de publication	Auteurs de l'étude	Pays concernés	Secteurs concernés	Principaux résultats
ETS (ca. €10)	Empirique ex post	2013	Bassi et al	Royaume-Uni	Energie et industrie	Pas d'impact économique notable de l'ETS européen au Royaume-Uni sur 2005-2010
ETS (ca. €10)	Empirique ex post	2013	Branger et al	UE	Sidérurgie et ciment	Pas d'impact économique notable de l'ETS dans l'UE sur la baisse de production sidérurgique et cimentière et les hausses des importations sur 2004-2012
ETS (ca. €10)	Empirique ex post	2014	Petrick et al	Allemagne	Industrie	Pas d'impact économique notable de l'ETS européen sur 2007-2010 sur l'emploi, la production ou les exportations des entreprises industrielles allemandes
ETS (ca. €10)	Empirique ex post	2014	Wagner et al	France	Industrie	Sur 2005-2010 l'emploi dans les usines françaises soumises à l'ETS diminue davantage que dans celles qui n'y sont pas soumises
ETS (ca. €10)	Empirique ex post	2015	Dechezleprêtre et al	UE	Industrie	Pas d'effet notable de de l'ETS européen sur les fuites de carbone au niveau des entreprises multinationales sur 2007-2014
ETS (ca. €10)	Empirique ex post	2015	Commission Européenne (CE Delft & Oeko-Institut)	UE	Ciment, pétrochimie, sidérurgie, engrais, raffinage, verre	L'étude porte sur la capacité des entreprises à transférer à leurs clients les coûts du carbone et conduit à des taux de transfert de 20% à 100%.
€ 13	Modélisation ex ante	2011	Aldy et al	Etats-Unis	Industrie	Effet d'un prix du carbone à \$15 aux Etats-Unis: Déclin de la production industrielle domestique de 1,5% en moyenne Déclin de la production de plus de 3-5% pour les industries les plus intensives en énergie (acier, aluminium, papier, ciment, verre, chimie). Dans ces industries intensives, déclin pas compensé pour plus d'un sixième par un surcroît d'importations
€ 16	Empirique ex post	2014	O'Gorman et al	Australie	Electricité	Impact du prix du carbone australien du 1er juillet 2012 au 30 juin 2014: baisse de 1,3% à 2,3% de la demande d'électricité, hausse de 10% du prix de l'électricité pour les ménages et de 15% du prix de l'électricité pour les clients industriels
€ 18	Modélisation ex ante	2012	Linares et al	Espagne	Ciment	Tout le clinker consommé en Espagne serait importé
€ 21	Modélisation ex ante	2012	Linares et al	Espagne	Sidérurgie	Tout l'acier consommé en Espagne serait importé
€ 26	Modélisation ex ante	2016	Grover et al	Royaume-Uni	Industrie	Un prix du carbone de €20 par tonne cause entre 2,1% et 3,4% d'augmentation de coût de production dans le ciment, la chimie et la métallurgie, et 0,9% d'augmentation du coût de production total de l'économie
€ 30	Modélisation ex ante	2016	RTE*	Europe de l'Ouest	Electricité	Réduction de 15% des émissions carbonées causées par la production électrique en Europe de l'Ouest. Augmentation du prix de l'électricité en France en relation avec une augmentation des coûts marginaux appelés de l'ordre de €12 par MWh

Figure 11 : Études réalisées sur les cinq dernières années au sujet de l'impact des prélèvements carbone sur la compétitivité économique.

Source : Recension réalisée par les auteurs.

Note : Les taux de conversion utilisés pour calculer les prélèvements à la tonne en euros ont été pris au 18 mai 2016 et sont les suivants : 1 dollar australien pour 0,65 euro, 1 dollar américain pour 0,88 euro et une livre britannique pour 1,28 euro.

	Scénario de référence 2015	Prix plancher 30€ France	Variation absolue	Variation relative
Production d'électricité domestique en TWh	533,6	519,1	-14,5	-2,7%
dont Charbon	8,6	3	-5,6	-65,5%
dont Gaz CCCG	12	3,1	-8,9	-74,2%
Importations d'électricité en TWh	29,6	44,1	14,5	49,0%
Emissions totales en MtCO₂	36,3	33,5	-2,8	-7,8%
dont domestiques	13,4	4,8	-8,7	-65,5%
dont importées	22,9	28,7	5,8	25,4%
Prix moyen de l'électricité en €/MWh	33,2	36,4	3,2	9,7%

Figure 12 : Résultats du scénario central de l'étude de la chaire « Économie du climat » sur un prélèvement de 30€/tonne réalisé exclusivement sur la production électrique française.

	Scénario de référence 2015	Prix plancher 30€ Union Européenne	Variation absolue	Variation relative
Production d'électricité domestique en TWh	533,6	534,5	0,8	0,2%
dont Charbon	8,6	7,6	-1	-11,6%
dont Gaz CCCG	12	13,8	1,8	14,9%
Importations d'électricité en TWh	29,6	28,8	-0,8	-2,7%
Emissions totales en MtCO₂	36,3	35,1	-1,2	-3,3%
dont domestiques	13,4	13,2	-0,2	-1,6%
dont importées	22,9	21,9	-1	-4,3%
Prix moyen de l'électricité en €/MWh	33,2	44,8	11,6	34,9%

Figure 13 : Impacts sur le secteur électrique français d'un prélèvement de 30€/tonne réalisé sur la production électrique européenne.

Prix de la tonne de CO ₂ éq.	Type d'étude	Année de publication	Auteurs de l'étude	Pays concernés	Secteurs concernés	Principaux résultats
€ 30	Modélisation ex ante	2015	Trotignon et al	France, Allemagne, Royaume-Uni, Pologne	Electricité	Si la mesure est appliquée sur les secteurs électriques de France, Allemagne, Royaume-Uni et Pologne, réduction des émissions de 36 Mt CO ₂ par an. Si la mesure est appliquée seulement au secteur électrique français, substitution quasi-intégrale par des importations des pays limitrophes
€ 30	Modélisation ex ante	2016	Thomson Reuters*	France	Electricité	Un prix plancher de 30 € la tonne sur l'électricité française augmenterait le prix de l'électricité en France de 8% et diminuerait de moitié les exportations nettes françaises d'électricité par rapport à 2015. Les réductions françaises d'émissions carbonées seraient largement compensées hors de France.
€ 30	Modélisation ex ante	2016	Engie*	France	Electricité	Un prix plancher de 30 € la tonne sur l'électricité française augmenterait le prix de l'électricité en France de 2,5€/MWh. Les réductions françaises d'émissions carbonées seraient largement compensées hors de France. Les productions françaises à base de charbon et de gaz seraient significativement impactées.
€ 30	Modélisation ex ante	2016	Direct Energie*	France et UE	Electricité	Une taxe de 30 € la tonne sur l'électricité française augmenterait le prix de l'électricité en France de 2 €/MWh et diminuerait de 40% les exportations nettes françaises d'électricité. Les réductions françaises d'émissions carbonées seraient largement compensées hors de France. Une taxe européenne de 30€ la tonne augmenterait de 12 €/ MWh le prix de l'électricité en France.
€ 30	Modélisation ex ante	2016	EDF*	France	Electricité	Un prix plancher de 30 € la tonne sur l'électricité française augmenterait le prix de l'électricité en France de 1,5€/MWh. Les réductions françaises d'émissions carbonées seraient largement compensées hors de France.
€ 30	Modélisation ex ante	2016	de Perthuis et al	UE et France	Electricité	Voir développement ci-après et annexe (étude réalisée dans le cadre de la mission)
€ 33	Modélisation ex ante	2013	Allevi et al	Italie et UE	Ciment	Dans le scénario de coûts élevés de transport maritime (le plus favorable): baisse de 48% de la production italienne de ciment, entièrement compensée par des importations (fuite carbone 100%), baisse de 17% de la production cimentière européenne partiellement compensée par des importations (fuite carbone de 64%)
€ 40	Modélisation ex ante	2012	Linares et al	Espagne	Raffinage pétrolier	Industrie espagnole du raffinage pétrolier en perte
€ 41	Modélisation ex ante	2013	UK Committee on Climate Change*	Royaume-Uni	Energie et industrie	Impact d'un prix du carbone de €32 en 2020: hausses de coût, plus ou moins transférées sur le consommateur, d'ici à 2020, pour papier, ciment, verre, chimie, acier, plastiques. Hausses de coût de l'énergie de 20 à 25% pour les clients industriels de 2011 à 2020
€ 54	Modélisation ex ante	2013	Allevi et al	Italie et UE	Ciment	Dans le scénario de coûts élevés de transport maritime (le plus favorable): baisse de 51% de la production italienne de ciment, baisse de 9% de la demande italienne de ciment, hausse des importations (fuite carbone 91%), baisse de 55% de la production cimentière européenne, baisse de la demande européenne de 20%, forte hausse des importations (fuite carbone de 64%)
€66 - €79 selon les modèles	Modélisation ex ante	2015	Boitier et al	France	Economie entière	Baisse du PIB français à trois ans entre 0,6 et 2% par rapport au scénario de référence sans taxe carbone

Figure 11 (suite) : Études réalisées sur les cinq dernières années au sujet de l'impact des prélèvements carbone sur la compétitivité économique.

prélèvement de 30 euros par tonne de CO₂ réalisé sur la production électrique européenne. Un prélèvement à cette hauteur causerait, selon les résultats de Dauphine, une hausse de près de 35 % du prix de l'électricité française (voir la Figure 13). Ce résultat est cohérent avec l'ordre de grandeur de 31 % qui résulte des simulations de RTE⁽⁸⁾.

Une hausse de 11,6 euros/MWh portant sur une consommation française de 475 TWh correspond à un surcoût de 5,5 milliards d'euros pour les consommateurs d'électricité (ménages et entreprises). Une hausse de 25 euros (différence entre 30 euros et la moyenne actuelle du marché) de la tonne de CO₂ sur le secteur électrique européen correspond à un surcroît de recettes pour la France (sous l'hypothèse d'assèchement préalable des droits d'émission disponibles) égale au produit de 25 euros par 35 Mt CO₂ émis, soit 875 millions d'euros.

L'enjeu du réinvestissement dans l'économie des montants prélevés

Pour limiter l'impact négatif à court et moyen terme du prélèvement carbone, voire le transformer en impact positif, il faut réinjecter dans l'économie, secteurs carbonés compris, tous les montants prélevés.

La question de la compensation, et de manière générale des effets positifs du prélèvement, est évidemment liée au type d'utilisation du montant prélevé au titre du carbone.

(8) RTE, Signal prix du CO₂, op. cit., p. 24. RTE calcule pour un prélèvement de 30 euros une augmentation du coût marginal moyen annuel de production d'électricité de 39 à 51 €/MWh, soit 30,8 %, et estime que cette augmentation des coûts marginaux pourrait induire une hausse du même ordre de grandeur de la facture des clients disposant de contrats indexés sur le prix du marché.

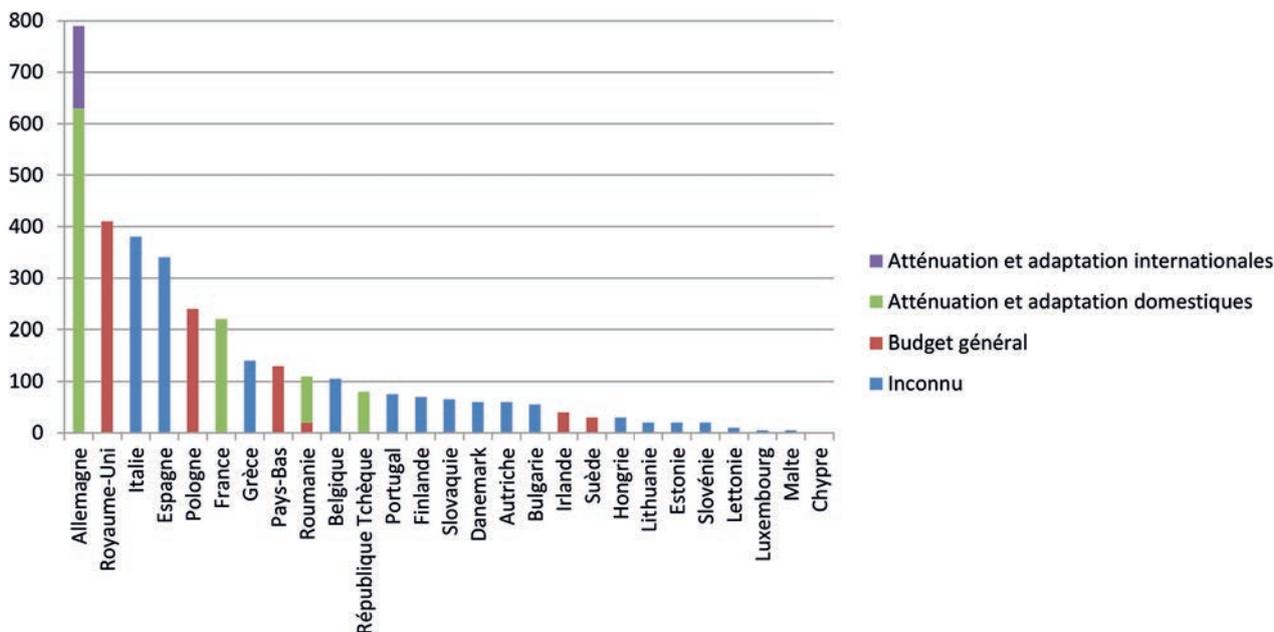


Figure 14 ; Recettes d'enchères ETS et utilisation de ces recettes dans les différents pays en 2013, en millions d'euros.
 Source : FLACHSLAND (Christian), Public Finance and the EU ETS: A Brief History and Implications of Potential Reform, contribution au séminaire « Closing the Carbon Price Gap: Public Finance and Climate Policy », Berlin, 22-23 mai 2014.

Les politiques nationales diffèrent à cet égard, comme le montre la Figure 14.

Il importe ici de bien distinguer l'effet à court ou moyen terme de l'effet à long terme.

Modélisation de l'impact économique à court et moyen terme d'une taxe carbone prélevée et intégralement redistribuée sous la forme de subventions à un autre secteur

Le développement qui suit rappelle un résultat microéconomique sur l'effet d'un impôt prélevé sur un secteur pour être réinvesti sous la forme de subventions dans un autre⁽⁹⁾, à savoir que sous hypothèse d'optimisation du profit par chacun des deux secteurs et indépendamment des objectifs d'intérêt général poursuivis, l'effet économique net sur l'ensemble des deux secteurs est négatif, un effet d'autant plus marqué que le prélèvement est important.

Pour le montrer, supposons deux secteurs économiques, le secteur 1 qui fabrique un produit en quantité q_1 , et le secteur 2 qui fabrique un produit en quantité q_2 . Le secteur 1 est carboné et soumis à un prélèvement carbone, le secteur 2 est non carboné et reçoit sous forme de subventions la recette du prélèvement carbone. Nous supposons qu'il existe une quantité $q_{1,0}$ (resp. $q_{2,0}$), qui maximise le profit du secteur 1 (respectivement secteur 2).

Avant prélèvement et subvention, le profit réalisé par le secteur 1 est $\Pi_1 = f_1(q_1)$, où f_1 trouve son maximum en $q_{1,0}$, et le profit réalisé par le secteur 2 est $\Pi_2 = f_2(q_2)$, où f_2 trouve son maximum en $q_{2,0}$.

Le prélèvement de e euros par unité produite de q_1 , suivi de la subvention de s euros par unité produite de q_2 , modifie les fonctions de profit des deux secteurs qui deviennent :

$$\Pi_1 = f_1(q_1) - eq_1$$

$$\Pi_2 = f_2(q_2) + sq_2$$

Où e et s sont liés par une condition de neutralité budgétaire $eq_1 = sq_2$, égalité entre prélèvement global et redistribution globale.

Le secteur 1 optimise alors son profit pour la quantité $q_{1,1}$, telle que $f'_1(q_{1,1}) = e$, et le secteur 2 optimise son profit pour la quantité $q_{2,1}$, telle que $f'_2(q_{2,1}) = -s$.

La variation de profit du secteur 1 est donc $\Delta \Pi_1 = f_1(q_{1,1}) - eq_{1,1} - f_1(q_{1,0})$ et la variation de profit du secteur 2 est $\Delta \Pi_2 = f_2(q_{2,1}) + sq_{2,1} - f_2(q_{2,0})$.

La variation de profit totale des deux secteurs est alors :

$$\Delta \Pi = \Delta \Pi_1 + \Delta \Pi_2 = f_1(q_{1,1}) - eq_{1,1} - f_1(q_{1,0}) + f_2(q_{2,1}) + sq_{2,1} - f_2(q_{2,0}) = f_1(q_{1,1}) - f_1(q_{1,0}) + f_2(q_{2,1}) - f_2(q_{2,0}), \text{ car } eq_{1,1} = sq_{2,1}.$$

Comme l'illustre la Figure 15, cette variation de profit totale est négative, car f_1 (respectivement f_2) atteint son maximum en $q_{1,0}$ (respectivement $q_{2,0}$).

Utilisation d'un prélèvement carbone pour alléger des taxes préexistantes

Un effet net légèrement positif peut néanmoins être constaté à court ou moyen terme si le prélèvement carbone, au lieu de subventionner un secteur indépendant du secteur de prélèvement, est utilisé pour diminuer ou supprimer des taxes préexistantes qui nuisent à la compétitivité⁽¹⁰⁾ de l'ensemble de l'économie (secteur carboné

(9) Nous nous inspirons ici de DEBREU (Gérard), "A classical tax-subsidy problem", in *Econometrica*, vol. 22, n° 1 (janvier. 1954), pp. 14-22.

(10) Voir à ce sujet, entre autres, ELBEZE (Jeremy) et PERTHUIS (Christian de), « Vingt ans de taxation du carbone en Europe : les leçons de l'expérience », in Cahiers de la chaire « Économie du climat », n°9, avril 2011.

compris). La modélisation de cet effet suppose de complexifier le modèle précédent et d'y introduire plusieurs facteurs de production, comme le capital, le travail ou l'énergie. Ainsi, la Suède et le Danemark ont utilisé le produit de taxes environnementales pour réduire la fiscalité sur le revenu ou le travail ⁽¹¹⁾.

On peut illustrer cet effet en supposant que la production de l'économie en euros vaut :

$P = f(K, E, L)$ fonction du capital K, de l'énergie E et du travail L, chacune de ces trois grandeurs étant exprimée dans l'unité qui lui est propre (euros pour K, unité d'énergie consommée pour E et hommes-jours pour L).

Les coûts unitaires sont r (en %) pour le capital K, c (en euros par unité d'énergie consommée) pour l'énergie E, et w (en euros par hommes-jours) pour le travail L.

Le profit dégagé par l'économie vaut :

$$\Pi = f(K, E, L) - rK - cE - wL$$

$$\text{maximisé pour } \frac{\partial f}{\partial K} = r, \frac{\partial f}{\partial E} = c \text{ et } \frac{\partial f}{\partial L} = w$$

Supposons K et r fixes. f est concave en chacune des deux variables E et L (rendements décroissants, dérivée seconde négative) : plus c est élevé, plus E est faible à l'optimum, et plus w est faible, plus L est élevé à l'optimum.

Une taxe carbone, c'est-à-dire un accroissement de c, peut être réinvestie en diminution du coût du travail w. Il en résulte donc une diminution de E et un accroissement de L.

Si l'on considère qu'il s'agit de petites variations autour de l'équilibre préalable à l'introduction de la taxe, on peut écrire (à K fixe) :

$$d\Pi = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \Pi}{\partial E^2} dE^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \Pi}{\partial L^2} dL^2 + \frac{\partial^2 \Pi}{\partial E \partial L} dE dL$$

En effet, les dérivées premières sont nulles et, comme indiqué plus haut, le montant de subvention compense le montant de prélèvement. Les deux premiers termes de l'expression sont négatifs par concavité en chacune des variables, mais le troisième peut être positif si la dérivée seconde croisée est négative (dE et dL sont de signes opposés), c'est-à-dire si la diminution de consommation énergétique augmente le profit marginal du travail. Cet effet pourrait expliquer que l'on trouve un effet net positif au réinvestissement d'un prélèvement carbone sous la forme d'allègements de charges. Il est cependant tout aussi envisageable que la diminution de consommation énergétique accroisse l'emploi peu qualifié et diminue donc le profit marginal du travail.

Solidarité intergénérationnelle à long terme et bénéfices sociaux à court terme

La justification économique du prélèvement carbone effectué sur un secteur pour le redistribuer à un autre réside dans les effets négatifs de long terme, qui sont évités par la réduction des émissions. Cette compensation des effets négatifs fait l'objet, notamment aux États-Unis, d'évaluation et d'actualisation complexes. Une fois évaluée et actualisée, elle bénéficie aux deux secteurs et corrige donc l'effet négatif de court et moyen terme.

La réduction des émissions carbonées peut aussi apporter dès le court terme des bénéfices sociaux, par exemple sanitaires, qui s'ajoutent évidemment, comme les bénéfices de solidarité intergénérationnelle, à tout calcul d'impact global.

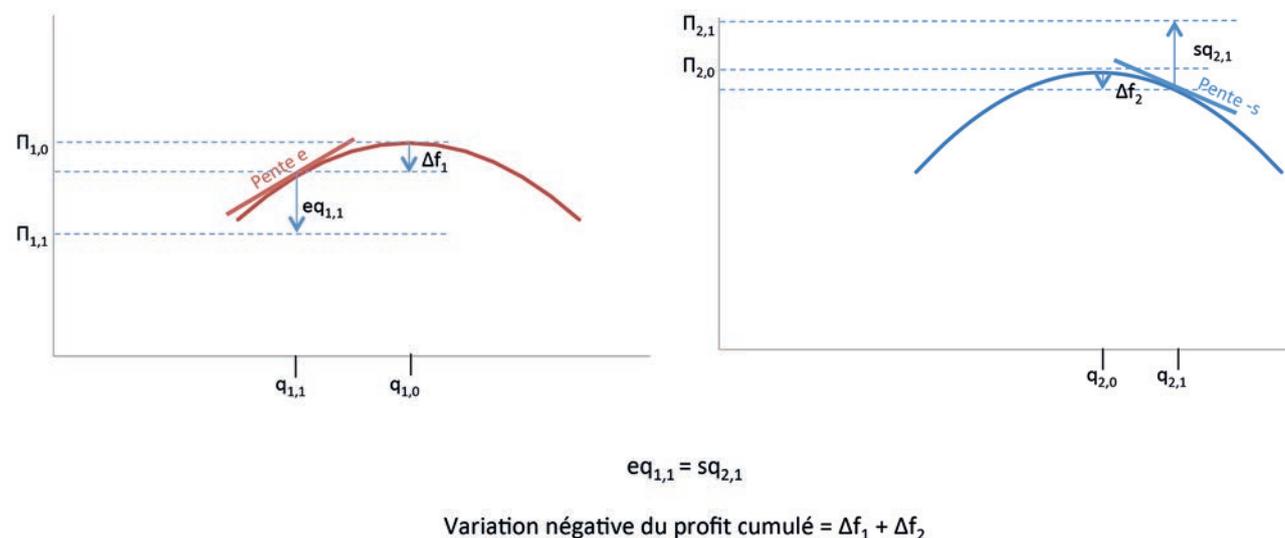


Figure 15 : Variation négative du profit cumulé entre un secteur imposé et un secteur subventionné sous hypothèse d'optimisation du profit.

(11) ELBEZE (Jeremy) et al., op. cit., encadré 1, p. 9.

Réinvestissement le plus efficient des montants prélevés

Une étude récente coordonnée par France Stratégie ⁽¹²⁾ a mis en œuvre différents modèles économétriques ⁽¹³⁾ pour évaluer l'impact d'une hausse du prix du carbone sur le PIB, l'emploi, les salaires et les prix. Les simulations entreprises ne font pas l'hypothèse du réinvestissement des recettes de la taxe ou de la mise aux enchères de quotas dans d'autres secteurs de l'économie, et concluent à un effet négatif sur le PIB, d'un ordre de grandeur équivalent à celui du montant prélevé sur l'économie par la puissance publique.

Ces résultats sont cohérents avec les développements précédents et mettent en lumière la nécessité du réinvestissement le plus efficient possible des montants prélevés dans l'économie. De ce point de vue, les allègements de charges paraissent la mesure la plus opérationnelle.

Bibliographie

Agence européenne de l'Environnement, base de données statistiques.

ALDY (Joseph E.) & PIZER (William A.), *The competitiveness impacts of climate change mitigation policies*, National Bureau of Economic Research Working Paper 17705, 2011.

ALLEVI (Elisabetta), OGGIONI (Giorgia), RICCARDI (Rosana) & ROCCO (Marco), "A spatial competitive analysis: the carbon leakage effect on the cement industry under the European Emissions Trading Scheme", Banca d'Italia, *Temi di discussione*, Working paper 899, 2013.

BASSI (Samuela), DECHEZLEPRÊTRE (Antoine) & FANKHAUSER (Sam), *Climate change policies and the UK business sector: overview, impacts and suggestions for reform*, Centre for Climate Change Economics and Policy & Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment Policy paper, 2013.

BOITIER (Baptiste), CALLONNEC (Gaël), DOUILLARD (Pierre), ÉPAULARD (Anne), GHERSI (Frédéric), MASSON (Emmanuelle) & MATHY (Sandrine), « La Transition énergétique vue par les modèles macroéconomiques », *Document de travail France-Stratégie*, n°2015-5, 2015.

BRANGER (Frédéric), QUIRION (Philippe) & CHEVALLIER (Julien), "Carbon leakage and competitiveness of cement and steel industries under the EU ETS: much ado about nothing", *Cired Working Paper Series* 53-2013, 2013.

CE Delft & Oeko Institut, *Ex-post investigation of cost pass-through in the EU ETS, An analysis for six sectors*, 2015.

DEBREU (Gérard), "A classical tax-subsidy problem", in *Econometrica*, vol. 22, n°1 (January 1954), pp. 14-22.

DECHEZLEPRÊTRE (Antoine), GENNAIOLI (Caterina), MARTIN (Ralf), MUÛLS (Mirabelle) & STOERK (Thomas), *Searching for carbon leaks in multinational companies*,

Centre for Climate Change Economics and Policy Working Paper, n°187, Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment Working Paper, n°165, 2015.

ELBEZE (Jeremy) & PERTHUIS (Christian de), « Vingt ans de taxation du carbone en Europe : les leçons de l'expérience », in *Cahiers de la chaire « Économie du climat »*, n°9, avril 2011.

FLACHSLAND (Christian), "Public Finance and the EU ETS: A Brief History and Implications of Potential Reform", contribution au séminaire « Closing the Carbon Price Gap: Public Finance and Climate Policy », Berlin, 22-23 mai 2014.

GROVER (David), SHREEDHAR (Ganga) & ZENGHELIS (Dimitri), *The competitiveness impact of a UK carbon price: what do the data say?*, ESRC Centre for Climate Change Economics and Policy & Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment Policy paper, 2016.

KOLÉDA (Gilles), *Allègements du coût du travail : pour une voie favorable à la compétitivité française*, La Fabrique de l'Industrie, 2015.

LINARES (Pedro) & SANTAMARÍA (Alberto), *The effects of carbon prices and anti-leakage policies on selected industrial sectors. An application to the cement, steel and oil refining industries in Spain*, 2012.

O'GORMAN (Marianna) & JOTZO (Frank), *Impact of the carbon price on Australia's electricity demand, supply and emissions*, Centre for Climate Economics and Policy, Crawford School of Public Policy, Australian National University, Working Paper, 1411, 2014.

PERTHUIS (Christian de), SOLIER (Boris) & TROTIGNON (Raphaël), *Prix-plancher du carbone pour le secteur électrique : quelles conséquences sur les marchés de l'électricité et du quota de CO₂ ?*, Université Paris-Dauphine, chaire « Économie du climat », 2016.

PETRICK (Sebastian) & WAGNER (Ulrich J.), *The impact of carbon trading on industry: evidence from German manufacturing firms*, Kiel Working Paper 1912, 2014.

RTE, « Signal prix du CO₂, analyse de son impact sur le système électrique européen », 2016.

Thomson Reuters, "Leading by example? Impacts of a domestic French carbon price floor", 2016.

TROTIGNON (Raphaël), SOLIER (Boris) & PERTHUIS (Christian de), *Un prix-plancher du carbone pour le secteur électrique : quelles conséquences ?*, Université Paris-Dauphine & CDC Climat, chaire « Économie du climat », Policy Brief 2015-03, 2015.

(12) BOITIER et al., *La Transition énergétique vue par les modèles macroéconomiques*, octobre 2015.

(13) Mésange, Némésis, *ThreeME et Imacim-R France*.