



**HAL**  
open science

# Dynamiques d'Arbitrage entre Écotaxe et Permis d'Emissions

Arnaud Dragicevic

► **To cite this version:**

Arnaud Dragicevic. Dynamiques d'Arbitrage entre Écotaxe et Permis d'Emissions. 2011. hal-00630035v2

**HAL Id: hal-00630035**

**<https://hal.science/hal-00630035v2>**

Preprint submitted on 10 Nov 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Dynamiques d'Arbitrage entre Écotaxe et Permis d'Émissions

*par*

Arnaud Z. Dragicevic

Agro ParisTech – Laboratoire d'Économie Forestière (INRA)

## Résumé

Ce papier propose trois analyses sur le mécanisme d'arbitrage entre l'écotaxe et le permis d'émissions. Nous redéfinissons l'équation du profit où nous injectons les paramètres d'intensité énergétique et de facteur d'émissions. Nous procédons à une étude statique puis à deux études dynamiques. Nos résultats mettent en exergue une simple règle d'arbitrage entre les deux instruments d'internalisation. Dans l'incertitude, la règle détermine si la taxe environnementale est sous- ou surévaluée par rapport au prix du permis d'émissions. De même, l'étude permet de déterminer le niveau global des recettes fiscales atteignable par la mise en vigueur de l'éco-fiscalité.

*Mots-clés* : profit déséconomique, éco-fiscalité, bourse du carbone, théorie des jeux évolutionnaires

## Abstract

This paper proposes three analyses of the tradeoff mechanism between the ecotax and the carbon credit. We redefine the equation of the profit, in which we inject the parameters of energy intensity and emission intensity. We proceed to one static and two dynamic studies. Our results highlight a simple tradeoff rule between the two internalization tools. In uncertainty, the rule determines whether the environmental tax is under- or overvalued compared to the carbon credit price. As well, the study enables to determine the global level of tax revenue attainable by the enforcement of the environmental taxation.

*Keywords*: diseconomic profit, environmental taxation, emissions trading, evolutionary game theory

*JEL Classification*: C7, F18, H21, H23, H32

D'abord, je tiens à remercier Christopher Green et Claude Montmarquette pour leurs suggestions avisées. Ensuite, je suis reconnaissant à Abdesslem Abbassi, Martial Foucault, Olivier Jay, Émilie Caldeira et Guy Meunier dont les commentaires ont fait progresser ce travail.

## 1. Introduction

Les principes microéconomiques, issus de l'observation factuelle, décrivent l'objectif des entreprises comme celui de la maximisation du profit économique. En dépit du coût induit par la prise en compte des dommages environnementaux ainsi que de l'incitation des producteurs à fausser l'information sur leur production et leurs coûts réels (Weitzman 1974), les entreprises ne sont plus en mesure d'obvier l'internalisation des externalités négatives, à l'instar des émissions de gaz à effet de serre devenues socialement néfastes. L'internalisation s'opère sous l'impulsion des politiques environnementales, lesquelles ont pour objet de créer des stimulants qui modifient le comportement des firmes vis-à-vis des dommages endossés par la collectivité.

Les producteurs invoquent l'érosion de la compétitivité du fait de l'internalisation du coût des émissions, et allèguent le risque de future faillite. Pourtant, le choix auquel sera confrontée l'entreprise, qui dépasse un seuil réglementaire des émissions instauré par l'autorité publique, ne sera pas entre payer une taxe environnementale ou acheter des permis d'émissions et faire faillite, mais rechercher des moyens pour réduire ses émissions (Bureau et Mougeot 2004). Nonobstant cette donnée, les entreprises continueront à favoriser le système d'internalisation le moins coûteux possible. Aussi, nous proposons trois analyses sur le mécanisme d'arbitrage entre écotaxes et permis d'émissions. Dans nos analyses, nous revisitons la notion de profit économique en intégrant dans le calcul des éléments qui sont au cœur même de l'économie environnementale, soient les dépenses en énergie et les émissions de carbone. Il s'agit d'un profit où l'on valorise la performance de l'entreprise vis-à-vis de l'empreinte carbone. Cette démarche tient au fait que la communauté mondiale fait face à la menace du changement climatique, que seule une action concertée des pays et de leurs industries peut sérieusement appréhender.

Les écotaxes et les permis négociables reposent sur le mécanisme de diffusion du signal-prix (Fischer 2001, 2003). Par le biais des écotaxes, énoncées par Pigou dès les années 1920, le régulateur introduit un correctif au prix de marché et laisse s'établir l'équilibre des quantités d'émissions. À l'inverse, les permis négociables, tels qu'ils se négocient sur le système d'échange de quotas (ETS), fixent des repères des émissions réglementaires, tandis que la réalisation des transactions conduit à la formation d'un prix de marché qui reflète la sévérité de la contrainte environnementale. Le choix entre prix et quantité, comme meilleur instrument de politique environnementale, est une question complexe et fait l'objet de débats depuis un certain temps (Weitzman 1974, Hoel et Karp 2002, Pizer 2002, Newell et Pizer 2003, Quirion 2005).

En cas de risques de dommages sévères, l'approche par les marchés de permis d'émissions garantit que la contrainte quantitative globale sur les émissions est respectée. À l'opposé, lorsque les dommages sont constants, l'approche par les écotaxes est préférable car elle permet d'éviter des coûts d'effort exorbitants (Criqui et Bureau 2009). Néanmoins, Requate et Unold (2003) et Saint-Paul (2004) concluent qu'il n'y a pas de hiérarchie irrévocable entre les deux instruments. Partant du principe qu'il est impossible pour l'autorité régulatrice de transmettre des prix ou des quantités idéaux (Weitzman 1974), comment les départager si les deux instruments sont mis en balance, voire l'un rivalise avec l'autre ?

Notre souhait est de comparer le niveau de l'écotaxe avec le prix du permis d'émissions par rapport au coût inhérent aux émissions. En analyse marginale, l'écotaxe et le permis d'émissions reflètent tous les deux le prix marginal du dommage environnemental, lequel s'égalise, à l'optimum social, avec le coût marginal du dommage. Weitzman (1974) révoque cette équivalence en présence d'incertitude ou d'asymétrie d'information. Dans son modèle, il considère que le régulateur ignore la réaction des producteurs, si bien que les décisions de ce-dernier peuvent s'avérer inefficaces.

La différence entre l'écotaxe et le permis d'émissions que nous mettons en évidence repose sur le fait qu'une entreprise puisse revendre ses excès de permis à la bourse du carbone, lorsqu'elle émet en deçà du seuil autorisé par les autorités régulatrices, alors que l'écotaxe impose l'internalisation, sans possibilité de revente, dès la première unité de carbone émise. Toutefois, à la marge, le permis équivaut à l'écotaxe, et l'entreprise s'approvisionne en permis sur le marché à hauteur de ses dépassements d'émissions<sup>1</sup>. Plutôt que d'opposer prix et quantités, à l'instar du modèle de Weitzman, nous pensons qu'une bonne régulation consiste à prendre en compte, de manière combinée, le coût et la quantité des dommages imposés à l'environnement. Pizer (2002) et Newell et Pizer (2003) prônent également l'avantage d'une politique hybride où les prix sont intégrés aux régulations basées sur les quantités. Malgré cela, notre outil de décision se base sur la taxinomie des pollutions, laquelle requiert un système d'internalisation mixte (Dragicevic et Sinclair-Desgagné 2010), et non sur l'étude de la pente des coûts marginaux d'abattement, à l'image des travaux cités plus haut. Également, nous interprétons nos résultats dans un modèle de performance environnementale.

Le profit est d'ordinaire défini comme le gain réalisé par le calcul de la différence entre le prix de vente de biens ou services et l'ensemble des coûts de production, à l'exception des coûts d'internalisation des externalités négatives, entrepris pour produire ces biens ou services. Nous redéfinissons l'équation du profit où nous injectons les paramètres d'intensité énergétique et de facteur des émissions, empruntés à la littérature macroéconomique, que nous convertissons en variables microéconomiques. Nous procédons à ces transformations

---

<sup>1</sup> Dans ce papier, nous ne considérons pas la question de la meilleure attribution des permis d'émissions, soit une distribution gratuite ou une allocation par mécanisme d'enchères. Nous savons que si les permis sont mis aux enchères, il y a équivalence entre permis et écotaxe. De manière synthétique, nous considérons qu'une firme achète des permis, à hauteur du dépassement du quota des émissions autorisé par le régulateur, auprès d'une autre firme qui n'en a pas besoin.

aussi bien pour le système d'écotaxes que celui des permis d'émissions. Cette déformation du profit nous permet d'introduire le profit déséconomique, soit un profit relatif à la performance environnementale. Les paramètres de l'entreprise représentative d'une économie peuvent aisément être spécifiés dans les équations. Il appartient aux décideurs publics de procéder à des simulations numériques économiques ou sectorielles selon l'objet d'étude visé.

Nous procédons à une étude statique puis à deux études dynamiques. Pour étudier l'économie dans le temps, soit l'évolution de la population des entreprises d'un secteur ou des secteurs économiques, nous adaptons la méthodologie de la dynamique des populations. Les économistes s'intéressent aux jeux évolutionnaires (Friedman 1991, 1996), pour ce qu'ils permettent de modéliser l'évolution des interactions répétées des populations entières. Ainsi, dans le temps, les stratégies dominantes sont celles qui se répandent parmi une population. Nos études mettent en exergue une simple règle d'arbitrage entre l'écotaxe et le permis, aussi bien dans le modèle statique que les modèles dynamiques. Au vu de la substituabilité entre les régimes d'internalisation, la règle permet au régulateur de viser le coût d'internalisation des émissions des firmes le moins élevé. Dans l'incertitude, la règle d'arbitrage détermine si le niveau de la taxe environnementale est sous- ou surévalué par rapport au prix du permis d'émissions. Somme toute, notre modèle permet de justifier la prévalence des régulations hybrides.

L'étude permet également de déterminer le niveau global des recettes fiscales atteignable par la mise en vigueur de l'éco-fiscalité. Ce niveau représente le seuil de financement réalisable, soit un outil d'aide à la décision pour amorcer la révolution technologique. En effet, il convient pour le régulateur de préserver des incitations à l'innovation et à la recherche, qui seraient autrement déficientes ; lorsque les marges de manœuvre techniques s'épuisent, l'éco-fiscalité apparaît décisive, puisque l'issue est de jouer sur les modes de comportement à long terme (Bureau et Hourcade 1998).

Après cette section introductive, nous présentons, dans une deuxième section, la nouvelle équation du profit d'une firme, ainsi que la règle d'arbitrage dans le contexte statique. Dans une troisième section, nous testons notre modèle au travers de la dynamique de sélection. Nous consacrons la section quatre à l'étude de la dynamique de conversion. Nous étudions l'impact de l'incertitude du prix du permis d'émissions sur la règle d'arbitrage dans la section cinq. La section six est conclusive.

## 2. Modèle statique

L'identité de Kaya (1989) constitue un modèle pour évaluer l'évolution des émissions de carbone. Elle décrit le niveau total des émissions comme le produit de quatre facteurs, soient la population, le produit intérieur brut par habitant, l'intensité énergétique par unité produite de produit intérieur brut ainsi que l'intensité en carbone par unité d'énergie consommée. Inspirés par ce travail, nous introduisons l'intensité énergétique et l'intensité des émissions dans le calcul du profit économique des firmes qui internalisent leurs externalités négatives. S'agissant d'entreprises, nous ne considérons pas les facteurs de population et de produit intérieur brut. Il est donc question d'intégrer les paramètres physiques dans les équations, afin de mesurer un profit économique qui soit proportionnel aux utilisations énergétiques et aux émissions de carbone. Nous le qualifions de *profit déséconomique*<sup>2</sup>. Le profit du producteur ne dépend donc plus des seuls paramètres économiques.

---

<sup>2</sup> Nous entendons par déséconomie une externalité négative, soit le coût qu'un agent économique impose à d'autres agents dans sa décision de production, sans que celui-ci soit pris en compte par le marché et se reflète dans les prix.

**Définition 1.** *Pour une production de biens ou services donnée, le profit déséconomique d'une firme est la différence entre le prix de vente et l'ensemble des coûts supportés – à l'exception du coût des dommages environnementaux – mesurée au prorata de l'intensité énergétique, nette du coût des externalités négatives valorisées au prorata de l'intensité des émissions.*

Nous considérons une économie où deux systèmes d'internalisation des externalités négatives coexistent. Soient respectivement (1) et (2) le profit déséconomique d'une firme qui paye une écotaxe et le profit déséconomique d'une firme qui achète un permis

$$\bar{\pi}_\tau = (py - qk) \frac{u}{y} - \tau y \frac{c}{y} \quad (1)$$

où  $p$  est le prix du produit fini ;  $y$  est la quantité de production ;  $q$  est le prix des facteurs de production ;  $k$  est la quantité de l'ensemble de facteurs de production nécessaires pour produire  $y$  ;  $\frac{u}{y}$  indique l'intensité énergétique de la firme avec  $u$  la quantité d'énergie consommée ;  $\tau$  est le niveau de l'écotaxe ;  $\frac{c}{y}$  mesure l'intensité en carbone dans le système productif avec  $c$  le niveau réel des émissions de la firme.

$$\bar{\pi}_c = (py - qk) \frac{u}{y} - ty \frac{c}{y} + ty \frac{\tilde{c}}{y} \quad (2)$$

où  $t$  est le prix exogène du permis d'émissions sur le marché du carbone, ce qui stipule que les producteurs sont preneurs de prix ;  $\tilde{c}$  est le seuil des émissions autorisées par le régulateur ;  $\frac{\tilde{c}}{y}$  représente l'intensité des émissions par unité produite ; enfin,  $ty \frac{\tilde{c}}{y}$  décrit le revenu issu de



la vente des excès de permis, lorsque les émissions réelles sont en deçà du seuil réglementaire des émissions.

Le profit déséconomique comprend l'intensité énergétique en tant que mesure de l'efficacité énergétique de la firme. Une intensité énergétique élevée correspond à une consommation énergétique importante pour un niveau de production donné. Elle se mesure par l'efficacité énergétique des machines et des bâtiments, les efforts de conservation ou de rationnement de l'énergie. Ainsi, le ratio  $\frac{u}{y}$  s'interprète comme le taux énergétique spécifique à la technologie utilisée par la firme. Le profit déséconomique comprend également l'intensité des émissions comme appréciation de l'amplitude des émissions de la firme. Elle désigne la quantité des émissions pour une production donnée. Le ratio  $\frac{e}{y}$  s'interprète comme le taux des émissions du producteur pour un type de technologie donné.

Polluantes ou pas, toutes les entreprises maximisent leurs profits. Étant donné qu'elles sont désormais dans l'obligation d'internaliser les externalités négatives, elles vont privilégier l'instrument de signal-prix qui leur procure le profit le plus élevé. Cela revient à viser le coût d'internalisation le moins élevé. Alors que les entreprises visent à maximiser leur profit économique, elles chercheront ici à minimiser leur profit déséconomique, les externalités négatives pesant sur les résultats financiers. Puisque les enjeux écologiques sont aujourd'hui autant considérés que les enjeux financiers, il apparaît opportun de comparer les entreprises suivant leur performance environnementale.

Le profit déséconomique ne s'interprète pas de la même manière que le profit économique. Alors que deux entreprises d'un même secteur industriel et de taille comparable peuvent avoir des profits économiques identiques, l'une peut afficher une intensité énergétique inférieure à l'autre, signifiant qu'elle est moins énergivore. Par conséquent, elle est plus performante du point de vue environnemental. En parallèle, plus son intensité en carbone est élevée, plus l'énergie est polluante. Le profit déséconomique permet donc de

mettre en perspective l'effort des entreprises qui réduisent leurs consommations énergétiques, mais également d'ajuster les coûts attribuables aux émissions à la quantité d'énergie utilisée. Il devient donc facile de discriminer entre les entreprises qui emploient des technologies respectueuses de l'environnement et les autres. Dans ce cas, l'enjeu pour un producteur est de maîtriser de front ses consommations énergétiques et ses émissions de carbone. Les émissions de carbone générant un coût pour la société, une firme qui affiche un profit déséconomique inférieur à celui de ses concurrents directs envoie un signal fort de son engagement vis-à-vis du développement durable.

**Définition 2.** *A profits économiques identiques, l'entreprise qui affiche un profit déséconomique moins élevé réalise une meilleure performance environnementale.*

Les équations (1) et (2) peuvent être réécrites en tant que

$$\bar{\pi}_\tau = (p - \frac{qk}{y})u - \tau c \quad (3)$$

$$\bar{\pi}_c = (p - \frac{qk}{y})u - t(c - \tilde{c}) \quad (4)$$

où  $u$  indique la quantité d'énergie consommée ;  $p - \frac{qk}{y}$  est la marge de profit par unité produite.

Lorsque  $\bar{\pi}_\tau > 0$ ,  $\tau < (p - \frac{qk}{y})\frac{u}{c}$ . Dans ce cas, le bénéfice généré par la consommation d'énergie dépasse le coût de l'internalisation des externalités. Lorsque  $\bar{\pi}_\tau = 0$ ,  $\tau = (p - \frac{qk}{y})\frac{u}{c}$ . Ici, le bénéfice s'égalise avec le coût de l'internalisation. Enfin, le déficit  $\bar{\pi}_\tau < 0$  correspond à

$\tau > (p - \frac{qk}{y}) \frac{u}{c}$  soit un bénéfice inférieur au coût de l'internalisation<sup>3</sup>. Nous voyons apparaître le paramètre  $\frac{u}{c}$  qui correspond à l'intensité énergétique des émissions.

**Définition 3.** *L'intensité énergétique des émissions mesure la consommation d'énergie par unité des émissions.*

A présent, si nous analysons les valeurs des émissions extrêmes, nous constatons que  $c \rightarrow \infty$  implique  $\lim_{c \rightarrow \infty} \tau = 0$ . De fait, un niveau des émissions très élevé reflète la mise en place d'une taxe nulle ou d'une régulation laxiste. *A contrario*, un niveau des émissions qui tend vers zéro indique la mise en place d'une correction fiscale très sévère.

Du côté des permis, nous avons  $\bar{\pi}_c > 0 \Leftrightarrow t < (p - \frac{qk}{y}) \frac{u}{c-\bar{c}}$ ,  $\bar{\pi}_c = 0 \Leftrightarrow t = (p - \frac{qk}{y}) \frac{u}{c-\bar{c}}$  et  $\bar{\pi}_c < 0 \Leftrightarrow t > (p - \frac{qk}{y}) \frac{u}{c-\bar{c}}$ . L'analyse des valeurs extrêmes indique que  $\lim_{c \rightarrow \infty} t = 0$  et  $\lim_{c \rightarrow 0} t = -(p - \frac{qk}{y}) \frac{u}{\bar{c}}$ . Alors qu'un prix de marché nul reflète un niveau des émissions très élevé, un prix de marché négatif reflète la revente de l'excès de permis à la bourse du carbone.

Suivant l'analyse économique standard, une meilleure performance économique signifie un profit économique plus élevé. Nous avons alors  $\pi_\tau > \pi_c$ . *A contrario*, l'entreprise qui affiche un profit déséconomique plus élevé affiche une moindre performance environnementale. De la sorte, si le profit déséconomique d'une firme qui internalise par les écotaxes est supérieur au profit déséconomique de celle qui achète des permis d'émissions, nous avons  $\bar{\pi}_\tau > \bar{\pi}_c$ . Cela donne  $(t - \tau)c > t\bar{c}$ . Réécrite, l'inégalité donne

---

<sup>3</sup> Un profit déséconomique négatif signifie que la pollution de la firme est disproportionnelle par rapport à son niveau de consommation d'énergie.

$$\tau < t \frac{c-\tilde{c}}{c} \quad (5)$$

Quand les émissions nettes sont positives ou  $c-\tilde{c} > 0$ , nous avons  $\tau > 0$ . Toutefois, si  $c-\tilde{c} < 0$ ,  $\tau < 0$ . Les Tableaux 1 et 2 (voir Annexe) illustrent le niveau de l'écotaxe par rapport aux paramètres qui se profilent dans (5). Nous pouvons alors présumer qu'en absence de demande de permis d'émissions à la bourse du carbone, le prix de compensation sera nul.

L'expression (5) révèle qu'un faible coût d'internalisation par l'écotaxe ne dépend que du prix du permis, des émissions nettes et des émissions réelles. Dans ce cas, l'arbitrage sur le choix d'instrument ne dépend pas des facteurs physiques dérivés de l'identité de Kaya. Seul le coût relatif mesuré entre les instruments d'internalisation compte. Si nous nous plaçons dans le cadre des déséconomies, l'inégalité dit qu'une piètre performance environnementale s'obtient en fixant un niveau d'écotaxe qui soit inférieur au produit entre le prix du permis et le rapport entre les émissions nettes et les émissions réelles. Cela se traduit par l'abandon du projet lié à l'éco-fiscalité ou l'exonération des firmes des pénalités relatives aux émissions. Cette exonération se trouve être une subvention vis-à-vis des firmes qui achètent des permis (Tableau 1 et Tableau 2). Cela nous ramène à la première proposition.

**Proposition 1.** *Pour un niveau de seuil réglementaire des émissions qui tend vers zéro ou un niveau des émissions réelles qui tend vers l'infini, une moindre performance environnementale implique un niveau de l'écotaxe inférieur au prix du permis d'émissions.*

Adossé à la régulation par les quantités, le niveau de la taxe environnementale est inversement proportionnel à la sévérité du seuil réglementaire des émissions de carbone. Plus le régulateur a des pratiques laxistes vis-à-vis des dommages environnementaux, plus le niveau de l'écotaxe sera petit.

Si le profit déséconomique d'une firme avec écotaxe est inférieur au profit déséconomique avec permis, soit une meilleure performance environnementale avec l'outil fiscal, nous avons  $\bar{\pi}_\tau < \bar{\pi}_c$ . Cela donne

$$\tau > t \frac{c-\tilde{c}}{c} \quad (6)$$

Lorsque  $c - \tilde{c} > 0$ , alors  $\tau > 0$ . Ainsi, lorsque les émissions réelles sont supérieures au seuil réglementaire des émissions, la valeur de l'écotaxe doit être positive.

**Proposition 2.** *Pour un niveau de seuil réglementaire des émissions qui tend vers zéro ou un niveau des émissions réelles qui tend vers l'infini, une meilleure performance environnementale implique un niveau de l'écotaxe supérieur au prix du permis d'émissions.*

Contrairement à la première proposition, la deuxième proposition suggère que la quantité de permis négociés sur le marché diminue avec le seuil réglementaire des émissions. Ce résultat s'explique aisément en contexte de restriction des émissions imposée par le régulateur. Lorsque le seuil est bas, les producteurs doivent acheter davantage de permis, ce qui entraîne un renchérissement des prix de production puis un ralentissement de l'activité industrielle. Il y a alors réduction des émissions et chute du prix du permis. Toutes choses égales par ailleurs, le niveau de l'écotaxe devient alors supérieur au prix du permis.

### 3. Modèle de la dynamique de sélection

Nous combinons théorie des jeux et dynamique des populations dans une équation du réplicateur. La sélection de marché advient lorsque les différents types d'entreprises

connaissent des niveaux distincts de profit déséconomique. Le type d'entreprise est déterminé par le signal-prix adopté pour internaliser les externalités négatives. Nous considérons des populations d'entreprises de types  $T$  et  $C$  infinies, aux portions respectives de poids sur le marché  $x$  et  $z$ , et de profits déséconomiques respectifs  $\bar{\pi}_\tau$  et  $\bar{\pi}_c$ . Nous avons  $x+z=1$ . La somme représente une densité de population normalisée telle que 0 correspond à une densité nulle et 1 correspond à une densité de population maximale. La valeur  $x=0$  signifie que tous les producteurs internalisent leurs externalités à la bourse du carbone ;  $x=1$  signifie que toutes les firmes sont soumises à l'écotaxe ; enfin,  $0 < x < 1$  signifie qu'une portion d'entreprises  $x$  paye l'écotaxe et le reliquat d'entreprises  $1-x$  internalise par les permis d'émissions.

Soit  $x(\omega)$  le nombre de firmes de type  $T$  au temps  $\omega$ . La croissance des sous-populations de firmes de types  $T$  et  $C$  se fait selon les équations différentielles de la dynamique du répliqueur (Hofbauer et Sigmund 1998). Étant donné que nous nous plaçons dans le modèle de la performance environnementale, le système devient

$$\begin{cases} \dot{x} = x(\langle \bar{\pi} \rangle - \bar{\pi}_\tau) \\ \dot{z} = z(\langle \bar{\pi} \rangle - \bar{\pi}_c) \end{cases}$$

où  $\langle \bar{\pi} \rangle = x\bar{\pi}_\tau + z\bar{\pi}_c$  reflète le profit déséconomique moyen. Nous pouvons remplacer  $z$  par  $1-x$ , ce qui réduit le système de réplication en une seule équation différentielle telle que  $\dot{x} = x(1-x)(\bar{\pi}_c - \bar{\pi}_\tau)$ . Désormais, la dynamique passe par la différence de profits entre les deux régimes d'internalisation. Résolue, l'équation donne

$$\dot{x} = x(1-x)[(\tau - t)c + t\tilde{c}] \quad (7)$$

L'équation différentielle possède deux points fixes qui annulent  $x(1-x)$  :  $x=0$  et  $x=1$ . En ces points d'équilibre, nous avons  $\dot{x}=0$ . La valeur  $x=1$  dit que si, au départ, les firmes sont toutes de type  $T$ , elles le restent ; le même raisonnement s'applique à  $x=0$  où seules les firmes de type  $C$  demeurent. Bien entendu, ces équilibres s'opèrent dans le postulat que l'autorité régulatrice abolit tout régime inefficace.

Si nous supposons que  $\dot{x} > 0$ , alors  $\bar{\pi}_c > \bar{\pi}_\tau$ . Nous obtenons ainsi l'inégalité  $(\tau-t)c + t\tilde{c} > 0$  ce qui donne encore

$$\tau > t \frac{c-\tilde{c}}{c} \quad (8)$$

Si  $\dot{x} < 0$  ou  $\bar{\pi}_c < \bar{\pi}_\tau$ , nous avons

$$\tau < t \frac{c-\tilde{c}}{c} \quad (9)$$

Nous obtenons les mêmes résultats dans le contexte statique que le contexte dynamique de sélection. Pour tout système mixte composé de firmes de types  $T$  et  $C$ , les firmes assujetties à l'écotaxe se répandent si, compte tenu du marché de permis, le profit déséconomique par l'écotaxe est plus petit. Tel est le cas lorsque  $\tau > t \frac{c-\tilde{c}}{c}$ .

**Proposition 3.** *La propagation de l'écotaxe dans l'économie dépend du dépassement du seuil réglementaire des émissions valorisé par le prix du permis d'émissions.*

Lorsque  $c \rightarrow 0$ ,  $\lim_{c \rightarrow 0} t \frac{c-\tilde{c}}{c} = -\infty$ , et donc  $\tau > -\infty$ . En parallèle,  $\lim_{c \rightarrow \infty} t \frac{c-\tilde{c}}{c} = t$  ce qui donne  $\tau > t$ . En cas des émissions qui tendent vers zéro, il suffit au régulateur de mettre en

vigueur une écotaxe de valeur non négative pour que les entreprises puissent minimiser leur profit déséconomique. En revanche, lorsque les émissions tendent vers l'infini, la valeur de l'écotaxe qui permet à une firme de minimiser son profit déséconomique doit être supérieure au prix du permis d'émissions.

Galiana et Green (2009) soutiennent que le système de seuil réglementaire des émissions devrait être remplacé par un système fiscal. Ce-dernier serait au service des investissements en recherche et développement (voir aussi Schelling 1992), afin d'amorcer une révolution technologique, vitale pour stabiliser le changement climatique. Les investissements seraient financés par un fonds dédié à cette fin. Ce fonds vert serait alimenté par des recettes fiscales récoltées par l'imposition de l'écotaxe  $\tau$ . Le niveau du fonds peut s'interpréter comme un seuil  $F$  qui permet d'actionner la révolution technologique verte.

Si nous considérons  $N$  entreprises sur le marché, auprès desquelles sont récoltées les recettes fiscales, nous avons

$$\frac{F}{N} = \tau y \quad (10)$$

Ainsi, la recette fiscale  $\tau y$  est égale à la juste part du seuil<sup>4</sup>. Lorsqu'on injecte cette identité dans (8), nous obtenons

$$\frac{F}{Ny} > t \frac{c-\tilde{c}}{c} \quad (11)$$

Et donc

---

<sup>4</sup> Nous entendons par juste part la contribution relative au seuil du fonds, compte tenu du nombre d'entreprises – qui participeraient à son financement – présentes dans l'économie.



$$F > Nyt \frac{c-\tilde{c}}{c} \quad (12)$$

Dans une économie où l'internalisation par l'écotaxe permet aux entreprises de minimiser leur profit déséconomique, le niveau du fonds dédié à la recherche et développement sera supérieur aux recettes de la bourse du carbone corrigées du rapport entre les émissions nettes et les émissions réelles.

**Proposition 4.** *Plus le seuil réglementaire des émissions est sévère, plus le niveau du fonds vert financé par l'éco-fiscalité sera grand.*

#### 4. Modèle de la dynamique de conversion

Une fois encore, considérons les entreprises de types  $T$  et  $C$ . Notons  $m_t$  le taux de conversion des firmes de type  $C$  en type  $T$  : il s'agit de la probabilité que la dynamique du réplicateur convertisse  $C$  en  $T$  (Nowak 2006) lors de la confrontation des stratégies d'internalisation dans le temps. Il y a par conséquent une disposition à passer d'une stratégie d'internalisation à l'autre qui dépend du coût d'internalisation des émissions de carbone. Nous supposons que le taux de conversion est relatif aux portions ou masses d'entreprises de chaque type déjà établies au sein de l'économie<sup>5</sup>. Attendu que la bourse du carbone est opérante et que l'écotaxe a du mal à s'imposer dans les économies industrialisées, nous nous focalisons sur la conversion de  $C$  en  $T$ , tel que l'ensemble des firmes finissent par être soumises à l'éco-fiscalité. Nous supposons que  $m_t = xe^{-x}$  où  $xe^{-x}$  est un processus de Poisson, au vu d'une portion moyenne de firmes  $x$  de type  $T$  qui est supposée être très faible.

---

<sup>5</sup> En effet, il est plus facile pour un producteur de rivaliser avec ses concurrents directs si l'ensemble des producteurs sont soumis au même régime d'internalisation.

Nous recherchons la probabilité que toutes les firmes soient soumises à l'écotaxe dans le temps ou  $j = 1$ , soit une densité de population maximale, si bien que la formule standard  $\frac{x^j e^{-x}}{j!}$  est réduite à  $x e^{-x}$ . Cette probabilité nous permet d'estimer l'amplitude de conversion des producteurs opérant sur le marché de permis en firmes imposables lors de la réplication des stratégies. Le système stochastique donne

$$\dot{x} = x(1-x)[[(p - \frac{qk}{y})u - t(c - \tilde{c})]x e^{-x} - [(p - \frac{qk}{y})u - \tau c]] \quad (13)$$

Si  $\bar{\pi}_c > \bar{\pi}_\tau$  alors

$$\tau > (1 - x e^{-x})(p - \frac{qk}{y})\frac{u}{c} + x e^{-x} t \frac{c - \tilde{c}}{c} \quad (14)$$

Contrairement aux résultats précédents qui sont indépendants des paramètres physiques, la dynamique de conversion montre que l'attractivité de l'écotaxe dépend de trois éléments qui sont l'intensité énergétique des émissions  $\frac{u}{c}$ , la marge de profit par unité produite  $p - \frac{qk}{y}$ , et le coût d'internalisation des émissions par le permis d'émissions  $t \frac{c - \tilde{c}}{c}$ .

La dynamique de conversion met donc en exergue l'intensité énergétique des émissions. Cette dernière révèle que la contrainte qui pèse sur le niveau de l'écotaxe à des fins de performance environnementale dépend de la quantité d'énergie consommée.

**Proposition 5.** *La dynamique de conversion envers l'éco-fiscalité dépend de l'intensité énergétique des émissions.*

Ce résultat s'accorde avec les travaux de Schipper *et al.* (1997) qui montrent qu'il y a une hausse des émissions de carbone depuis les années 1990, à cause du ralentissement du déclin des intensités énergétiques. Seule une innovation technologique majeure permettrait de réduire l'intensité énergétique ou le contenu de l'énergie en carbone. Le fonds vert financé par l'écotaxe permettrait de mettre cette réduction en mouvement.

Grâce à (10), nous savons que  $\tau = \frac{F}{Ny}$  ce qui se traduit par

$$F > Ny[(1 - xe^{-x})(p - \frac{qk}{y})\frac{u}{c} + xe^{-x}t\frac{c-\tilde{c}}{c}] \quad (15)$$

Dans la dynamique de conversion, le seuil du fonds vert doit être supérieur à l'expression (14) multipliée par la production globale. Nous observons que le seuil du fonds vert augmente lorsque le seuil réglementaire des émissions baisse. Si nous examinons maintenant la différence entre le niveau du fonds lorsque  $x \rightarrow 0$  et  $x \rightarrow 1$ , nous obtenons  $t > (p - \frac{qk}{y})\frac{u}{c-\tilde{c}}$ . Pour que l'ensemble du tissu industriel adopte l'éco-fiscalité et nourrisse le fonds environnemental, le prix du permis d'émissions devra être supérieur au produit de la marge de profit et du rapport entre la consommation d'énergie et les émissions nettes.

Fixer  $\dot{x} = 0$  génère deux points fixes de la dynamique du répliqueur :  $x = 0$  et  $x = 1$ . Nous procédons à l'étude des états stationnaires par la méthode de Lyapunov. La dérivation donne

$$f'(\dot{x}) = (1 - 2x)[[(p - \frac{qk}{y})u - t(c - \tilde{c})]xe^{-x} - [(p - \frac{qk}{y})u - \tau c]] + x(1 - x)^2[e^{-x}[(p - \frac{qk}{y})u - t(c - \tilde{c})]] \quad (16)$$

En  $x = 0$ , où aucune firme n'est soumise à l'écotaxe, nous avons

$$f'(0) = -u\left(p - \frac{qk}{y}\right) + \tau c \geq 0 \quad (17)$$

Si  $\tau < \left(p - \frac{qk}{y}\right) \frac{u}{c}$ ,  $f'(0) < 0$  et l'équilibre est stable. Autrement, il est instable. En effet, lorsque le niveau de l'écotaxe est inférieur à la marge de profit proportionnelle à l'intensité énergétique des émissions, aucune firme n'a intérêt à minimiser son profit déséconomique par l'éco-fiscalité. Distinguons maintenant deux cas. Lorsque  $c \rightarrow \infty$ ,  $\lim_{c \rightarrow \infty} \left(p - \frac{qk}{y}\right) \frac{u}{c} = 0$  soit  $\tau < 0$ . Lorsque  $c \rightarrow 0$ ,  $\lim_{c \rightarrow 0} \left(p - \frac{qk}{y}\right) \frac{u}{c} = \infty$  soit  $\tau < \infty$ .

**Proposition 7.** *L'état  $x=0$  est stationnaire pour un niveau d'émissions qui tend vers*

- *l'infini et un niveau de l'écotaxe tel que  $\tau < 0$ ,*
- *zéro et un niveau de l'écotaxe tel que  $\tau < \infty$ .*

En  $x=1$ , où toutes les firmes sont soumises à l'écotaxe, nous trouvons

$$f'(1) = \frac{e-1}{e} \left(p - \frac{qk}{y}\right) u + \frac{t}{e} (c - \tilde{c}) - \tau c \geq 0 \quad (18)$$

Si  $\tau > \frac{e-1}{e} \left(p - \frac{qk}{y}\right) \frac{u}{c} + \frac{t}{e} \frac{c-\tilde{c}}{c}$ , nous avons  $f'(1) < 0$  soit un état stationnaire, et  $f'(1) > 0$  sinon.

Lorsque  $c \rightarrow \infty$ ,  $\lim_{c \rightarrow \infty} \frac{e-1}{e} \left(p - \frac{qk}{y}\right) \frac{u}{c} + \frac{t}{e} \frac{c-\tilde{c}}{c} = \frac{t}{e}$  soit  $\tau > \frac{t}{e}$ . Ensuite, lorsque  $c \rightarrow 0$ ,

$\lim_{c \rightarrow 0} \frac{e-1}{e} \left(p - \frac{qk}{y}\right) \frac{u}{c} + \frac{t}{e} \frac{c-\tilde{c}}{c} = \infty [-\text{sgn}[(1-e)u\left(p - \frac{qk}{y}\right) + t\tilde{c}]]$  soit  $\tau > \infty$ .

**Proposition 8.** *L'état  $x=1$  est stationnaire pour un niveau d'émissions qui tend vers*

- *l'infini et un niveau de l'écotaxe tel que  $\tau > \frac{t}{e}$ ,*
- *zéro et un niveau de l'écotaxe tel que  $\tau > \infty$ .*

Nous observons donc que la performance environnementale stimulée par les écotaxes prend tout son sens lorsque les émissions réelles sont très au-dessus du seuil fixé par le régulateur. Dans le cas contraire, le marché du carbone apparaît préférable.

Prospectons maintenant l'équilibre intérieur où il y a coexistence entre les deux régimes d'internalisation. Nous supposons que  $g(x) = \bar{\pi}_c - \bar{\pi}_r$  soit

$$g(x) = [(p - \frac{qk}{y})u - t(c - \tilde{c})]xe^{-x} - [(p - \frac{qk}{y})u - \tau c] \quad (19)$$

L'équilibre intérieur est la racine de  $g(x)$  dans  $[0,1]$ . Nous avons  $f(0) < 0$  lorsque

$\tau < (p - \frac{qk}{y})\frac{u}{c}$ , et  $f(1) > 0$  lorsque  $\tau > \frac{e-1}{e}(p - \frac{qk}{y})\frac{u}{c} + \frac{t}{e}\frac{c-\tilde{c}}{c}$ . La différentiation donne

$g'(x) = e^{-x}(1-x)[(p - \frac{qk}{y})u - t(c - \tilde{c})]$  soit une fonction croissante pour  $t < (p - \frac{qk}{y})\frac{u}{c-\tilde{c}}$ . Enfin,

$g(x) = 0$  donne

$$xe^{-x} = \frac{(p - \frac{qk}{y})u - \tau c}{(p - \frac{qk}{y})u - t(c - \tilde{c})} \quad (19')$$

Pour résoudre cette équation qui implique un nombre complexe, nous avons besoin de la fonction  $W$  de Lambert, laquelle définit la réciproque de  $xe^{-x}$ , c'est-à-dire  $x = W(xe^{-x})$ . Nous fixons (19') comme  $\Phi$ , ce qui donne  $xe^{-x} = \Phi$ . Nous obtenons  $-xe^{-x} = -\Phi$  ou  $-x = W(-\Phi)$  soit  $x = -W(-\Phi)$ . Sachant la valeur de  $\Phi$ , l'équilibre s'élève à

$$x^* = -W \left[ -\frac{(p - \frac{qk}{y})u - \tau c}{(p - \frac{qk}{y})u - t(c - \tilde{c})} \right] \quad (20)$$

En  $x^*$ , nous obtenons

$$g'(x^*) = e^{-x^*} (1 - x^*) [(p - \frac{qk}{y})u - t(c - \tilde{c})] \geq 0 \quad (21)$$

Si  $t > (p - \frac{qk}{y})\frac{u}{c - \tilde{c}}$ , alors  $g'(x^*) < 0$  et l'équilibre est stable. Si  $t < (p - \frac{qk}{y})\frac{u}{c - \tilde{c}}$ , il est instable.

**Proposition 9.** *Lorsque la marge de profit valorisée au prorata de l'intensité énergétique des émissions nettes est inférieure au prix du permis d'émissions, il existe un équilibre de Nash unique et stable.*

Ainsi  $\lim_{c \rightarrow \infty} (p - \frac{qk}{y})\frac{u}{c - \tilde{c}} = 0$  soit  $t > 0$  et  $\lim_{c \rightarrow 0} (p - \frac{qk}{y})\frac{u}{c - \tilde{c}} = -(p - \frac{qk}{y})\frac{u}{\tilde{c}}$  soit  $t > -(p - \frac{qk}{y})\frac{u}{\tilde{c}}$ .

L'étude des émissions aux valeurs extrêmes nous ramène à la prochaine proposition.

**Proposition 10.** *L'état  $x = x^*$  est stationnaire pour un niveau d'émissions qui tend vers*

- *l'infini et un prix du permis d'émissions tel que  $t > 0$ ,*
- *zéro et un prix du permis d'émissions tel que  $t > -(p - \frac{qk}{y})\frac{u}{\tilde{c}}$ .*

## 5. Incertitude

Tol (2005) rappelle que vingt-huit études ont dévoilé cent-trois estimations du coût marginal du dommage lié aux émissions de carbone. Aussi, nous constatons une grande variabilité dans

les chiffres, ce qui montre que l'incertitude a une forte influence sur le prix des dommages. L'évolution du prix du carbone dans le temps est dictée par l'évolution du dommage marginal (Gollier 2009). Supposons une croissance de la concentration de carbone dans le temps, ce qui a pour effet d'accroître le prix du permis d'émissions (Nordhaus 2008, Gollier 2009). La magnitude de l'augmentation reste néanmoins inconnue. Le prix du permis d'émissions dans l'incertitude devient

$$t + \Delta t = t(1 + \Delta) \quad (22)$$

où  $\Delta \geq 0$  représente le paramètre d'incertitude. Introduite dans notre règle d'arbitrage, l'incertitude donne

$$\tau > t(1 + \Delta) \frac{c - \tilde{c}}{c} \quad (23)$$

Tableau 3 (voir Annexe) révèle que l'introduction de l'incertitude dans le prix du permis d'émissions se répercute dans la valorisation de l'écotaxe. L'impact est beaucoup plus marqué lorsque  $c - \tilde{c} < 0$  qu'à l'opposé. L'incertitude joue donc un rôle d'amplificateur du subventionnement vis-à-vis des entreprises qui internalisent par le marché de permis.

Réécrite, l'inégalité donne

$$\tau \frac{1}{1 + \Delta} > t \frac{c - \tilde{c}}{c} \quad (24)$$

Nous observons que l'expression  $\frac{1}{1 + \Delta}$  revient au taux de croissance moyen. Le ratio entre l'écotaxe et le taux de croissance du prix du permis d'émissions permet de voir si le niveau de

la taxe est sous- ou surévalué par rapport au prix du permis. Aussi, l'introduction de l'incertitude rajoute une nouvelle dimension de comparaison à la règle d'arbitrage.

**Proposition 10.** *Lorsque le ratio entre l'écotaxe et le taux de croissance est inférieur à un, l'écotaxe est sous-évaluée par rapport au permis d'émissions ; elle est surévaluée, sinon.*

En effet, dès lors que le prix du permis est constant ou  $\Delta = 0$ , le ratio se résume à  $\tau \frac{1}{1+\Delta} = \tau$ , ce qui implique que l'écotaxe est évaluée à sa juste valeur. Lorsque  $\Delta > 0$ , nous avons  $\tau \frac{1}{1+\Delta}$ . Si  $\Delta \rightarrow \infty$ , alors  $\tau \frac{1}{1+\Delta} \rightarrow 0$ .

## 6. Conclusion

Quand bien même il serait difficile pour le régulateur d'établir une hiérarchie entre les instruments d'internalisation, ce papier permet de considérer le problème du point de vue des firmes présumées les appliquer, dont la logique privilégie le coût inhérent à l'internalisation des émissions le moins élevé possible. La régulation qui incorpore ces éléments doit obligatoirement être hybride, c'est-à-dire qu'elle doit à la fois prendre en compte les prix et les quantités des dommages environnementaux. Toutefois, nous avons intégré la logique d'internalisation des externalités négatives dans un contexte environnemental, où l'entreprise cherche à minimiser son profit déséconomique.

Il est évident qu'introduire un instrument correctif fera l'objet de contestations et de pressions des secteurs industriels. Comme l'internalisation n'est plus une question de volontarisme, lequel s'est d'ailleurs révélé être d'efficacité mitigée (OCDE 2003), une manière de détourner les obstacles comminatoires est de proposer aux firmes l'outil le moins coûteux. Bien que le régulateur doive idéalement définir des objectifs de performance



environnementale propres à chaque firme, cette méthode est inefficace, compte tenu des frais administratifs qu'il aurait à engager. Ainsi, le régulateur peut arbitrer en se basant sur les caractéristiques de l'entreprise représentative d'un secteur ou d'une économie. La robustesse de la règle d'arbitrage, aussi bien en contexte statique que celle de la dynamique des populations, légitime une telle approche.

Dragicevic et Sinclair-Desgagné (2010) proposent un système d'internalisation mixte comprenant les écotaxes et les permis d'émissions. Sa justification repose sur la distinction des sources et des émissions de pollution. Leur étude conclut que le marché du carbone ne doit couvrir que le segment des émissions locales de sources ponctuelles. Nous observons cette configuration chez les producteurs d'énergie et les secteurs à forte intensité énergétique. Tous les autres segments émetteurs de gaz à effet de serre doivent par conséquent être pris en charge par l'éco-fiscalité. Opérer un retournement de telle envergure implique un niveau d'écotaxe qui soit adapté à la majeure partie du tissu industriel.

## **Bibliographie**

- Bressand, F., Farrell, D., Haas, P., Morin, F., Nyquist, S., Remes, J., Roemer, S., Rogers, M., Rosenfeld, J. et Woetzel, J. (2007), "Curbing Global Energy Demand Growth: The Energy Productivity Opportunity", McKinsey Global Institute.
- Bureau, D. et Hourcade, J-C. (1998), "Les Dividendes Économiques d'une Réforme Fiscale Écologique", Rapport du CAE 8, La Documentation Française, Paris.
- Bureau, D. et Mougeot, M. (2004), "Politiques Environnementales, Fiscalité et Compétitivité des Entreprises", Rapport du CAE, n°54, La Documentation Française, Paris.
- Criqui, P. et Bureau, D. (2009), "Écotaxes et Quotas d'Émissions Échangeables CO<sub>2</sub>", Références économiques CEDD 6.
- Dragicevic, A. et Sinclair-Desgagné, B. (2010), "Éco-Fiscalité et Réduction d'Émissions de Gaz à Effet de Serre", in *Le Québec Économique 2010 : Vers un Plan de Croissance pour le Québec*, Joanis, M. and Godbout, L. (eds.), Presses de l'Université Laval, Québec.
- Fischer, C. (2001), "Rebating Environmental Policy Revenues: Output-Based Allocations and Tradable Performance Standards", Resources for the Future Discussion Paper 01–2001.
- Fischer, C. (2003), "Combining Rate-Based and Cap-and-Trade Emissions Policies", Resources for the Future Discussion Paper 32–2003.
- Friedman, D. (1991), "Evolutionary Games in Economics", *Econometrica*, 59: 637–666.

- Friedman, D. (1996), "Equilibrium in Evolutionary Games: Some Experimental Results", *Economic Journal*, 106: 1–25.
- Galiana, I. et Green, C. (2009), "Let the Global Technology Race Begin", *Nature*, 462: 570–571.
- Gollier, C. (2009), "Copenhague 2009 : Incertitude et Prix du Carbone", Rapport du CAE 87, Complément au rapport, La Documentation Française, Paris.
- Hoel, M. et Karp, L. (2002), "Taxes versus Quotas for a Stock Pollutant", *Resource and Energy Economics*, 24: 367–384.
- Hofbauer, J. et Sigmund, K. (1998), "Evolutionary Games and Population Dynamics", Cambridge University Press, Cambridge.
- Kaya, Y. (1989), "Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios", IPCC Response Strategies Working Group Memorandum.
- Newell, R. et Pizer, W. (2003), "Regulating Stock Externalities under Uncertainty", *Journal of Environmental Economics and Management*, 45: 416–432.
- Nowak, M. (2006), "Evolutionary Dynamics: Exploring the Equations of Life", Harvard University Press, Cambridge et Londres.
- Nordhaus, W. (2008), "A Question of Balance: Weighing the Options on Global Warming Policies", Yale University Press, New Haven et Londres.
- OCDE (2003), "Les Approches Volontaires dans les Politiques de l'Environnement", OCDE, Paris.
- Pizer, W. (2002), "Combining Price and Quantity Controls to Mitigate Global Climate Change", *Journal of Public Economics*, 85: 409–434.
- Quirion, P. (2005), "Does Uncertainty Justify Intensity Emission Caps", *Resource and Energy Economics*, 27: 343–353.
- Requate, T. et Unold, W. (2003), "Environmental Policy Incentives to Adopt Advanced Abatement Technology: Will the True Ranking Please Stand Up?", *European Economic Review*, 47: 125–146.
- Saint-Paul, G. (2004), "Fiscalité Environnementale et Compétitivité", Rapport du CAE 54, Complément au rapport, La Documentation Française, Paris.
- Schelling, T. (1992), "Some Economics of Global Warming", *American Economic Review*, 82: 1–14.
- Schipper, L., Ting, M., Khrushch, M. et Golove, W. (1997), "The Evolution of Carbon Dioxide Emissions from Energy Use in Industrialized Countries: An End-Use-Analysis", *Energy Policy*, 25: 651–672.
- Tol, R. (2005), "The Marginal Damage Costs of Carbon Dioxide Emissions: An Assessment of the Uncertainties", *Energy Policy*, 33: 2064–2074.
- Weitzman, M. (1974), "Prices vs. Quantities", *Review of Economic Studies*, 41: 477–491.

## **Annexe**

Tableau 1 Simulations en euros du niveau de l'écotaxe, relativement à  $c$  et  $\tilde{c}$  en tonnes, pour  $t = 15$  euros :  $\tau = t \frac{c - \tilde{c}}{c}$

$c / \tilde{c}$	0	5	10	20	25	40	50	75	90	95	100
0											
5	15.00	0.00	-15.00	-45.00	-60.00	-105.00	-135.00	-210.00	-255.00	-270.00	-285.00
25	15.00	12.00	9.00	3.00	0.00	-9.00	-15.00	-30.00	-39.00	-42.00	-45.00
50	15.00	13.50	12.00	9.00	7.50	3.00	0.00	-7.50	-12.00	-13.50	-15.00
75	15.00	14.00	13.00	11.00	10.00	7.00	5.00	0.00	-3.00	-4.00	-5.00
100	15.00	14.25	13.50	12.00	11.25	9.00	7.50	3.75	1.50	0.75	0.00
105	15.00	14.29	13.57	12.14	11.43	9.29	7.86	4.29	2.14	1.43	0.71
125	15.00	14.40	13.80	12.60	12.00	10.20	9.00	6.00	4.20	3.60	3.00
150	15.00	14.50	14.00	13.00	12.50	11.00	10.00	7.50	6.00	5.50	5.00
175	15.00	14.57	14.14	13.29	12.86	11.57	10.71	8.57	7.29	6.86	6.43
200	15.00	14.63	14.25	13.50	13.13	12.00	11.25	9.38	8.25	7.88	7.50

Tableau 2 Simulations en euros du niveau de l'écotaxe, relativement à  $c$  et  $\tilde{c}$  en tonnes, pour  $t = 30$  euros :  $\tau = t \frac{c-\tilde{c}}{c}$

$c/\tilde{c}$	0	5	10	20	25	40	50	75	90	95	100
0											
5	30.00	0.00	-30.00	-90.00	-120.00	-210.00	-270.00	-420.00	-510.00	-540.00	-570.00
25	30.00	24.00	18.00	6.00	0.00	-18.00	-30.00	-60.00	-78.00	-84.00	-90.00
50	30.00	27.00	24.00	18.00	15.00	6.00	0.00	-15.00	-24.00	-27.00	-30.00
75	30.00	28.00	26.00	22.00	20.00	14.00	10.00	0.00	-6.00	-8.00	-10.00
100	30.00	28.50	27.00	24.00	22.50	18.00	15.00	7.50	3.00	1.50	0.00
105	30.00	28.57	27.14	24.29	22.86	18.57	15.71	8.57	4.29	2.86	1.43
125	30.00	28.80	27.60	25.20	24.00	20.40	18.00	12.00	8.40	7.20	6.00
150	30.00	29.00	28.00	26.00	25.00	22.40	20.00	15.00	12.00	11.00	10.00
175	30.00	29.14	28.29	26.57	25.71	23.14	21.43	17.14	14.57	13.71	12.86
200	30.00	29.25	28.50	27.00	26.25	24.00	22.50	18.75	16.50	15.75	15.00

Tableau 3 Simulations en euros du niveau de l'écotaxe relativement à  $\Delta$ , pour  $\tilde{c} = 100$  tonnes et  $t = 15$  euros :  $\tau = t(1 + \Delta) \frac{c - \tilde{c}}{c}$

$\Delta / c - \tilde{c}$	-100	-75	-50	-25	-5	0	5	25	50	75	100
0		-45.00	-15.00	-5.00	-0.79	0.00	0.71	3.00	5.00	6.43	7.50
0.01		-45.45	-15.15	-5.05	-0.80	0.00	0.72	3.03	5.05	6.49	7.58
0.1		-49.50	-16.50	-5.50	-0.87	0.00	0.79	3.30	5.50	7.07	8.25
0.2		-54.00	-18.00	-6.00	-0.95	0.00	0.86	3.60	6.00	7.71	9.00
0.5		-67.50	-22.50	-7.50	-1.18	0.00	1.07	4.50	7.50	9.64	11.25
0.75		-78.75	-26.25	-8.75	-1.38	0.00	1.25	5.25	8.75	11.25	13.13
0.9		-85.50	-28.50	-9.50	-1.50	0.00	1.36	5.70	9.50	12.21	14.25
1		-90.00	-30.00	-10.00	-1.58	0.00	1.43	6.00	10.00	12.86	15.00
5		-270.00	-90.00	-30.00	-4.74	0.00	4.29	18.00	30.00	38.57	45.00
10		-495.00	-165.00	-55.00	-8.68	0.00	7.86	33.00	55.00	70.71	82.50
25		-1170.00	-390.00	-130.00	-20.53	0.00	18.57	78.00	130.00	167.14	195.00