

2011s-45

# **Dynamiques d'arbitrage entre écotaxe et permis d'émissions**

*Arnaud Z. Dragicevic*

---

**Série Scientifique**  
*Scientific Series*

---

**Montréal**

Mai 2011

**Cette version : septembre 2011 / This version : September 2011**

© 2011 Arnaud Z. Dragicevic. Tous droits réservés. *All rights reserved.* Reproduction partielle permise avec citation du document source, incluant la notice ©.

*Short sections may be quoted without explicit permission, if full credit, including © notice, is given to the source.*



Centre interuniversitaire de recherche en analyse des organisations

## **CIRANO**

Le CIRANO est un organisme sans but lucratif constitué en vertu de la Loi des compagnies du Québec. Le financement de son infrastructure et de ses activités de recherche provient des cotisations de ses organisations-membres, d'une subvention d'infrastructure du Ministère du Développement économique et régional et de la Recherche, de même que des subventions et mandats obtenus par ses équipes de recherche.

*CIRANO is a private non-profit organization incorporated under the Québec Companies Act. Its infrastructure and research activities are funded through fees paid by member organizations, an infrastructure grant from the Ministère du Développement économique et régional et de la Recherche, and grants and research mandates obtained by its research teams.*

### **Les partenaires du CIRANO**

#### **Partenaire majeur**

Ministère du Développement économique,  
de l'Innovation et de l'Exportation

#### **Partenaires corporatifs**

Autorité des marchés financiers  
Banque de développement du Canada  
Banque du Canada  
Banque Laurentienne du Canada  
Banque Nationale du Canada  
Banque Royale du Canada  
Banque Scotia  
Bell Canada  
BMO Groupe financier  
Caisse de dépôt et placement du Québec  
Fédération des caisses Desjardins du Québec  
Financière Sun Life, Québec  
Gaz Métro  
Hydro-Québec  
Industrie Canada  
Investissements PSP  
Ministère des Finances du Québec  
Power Corporation du Canada  
Raymond Chabot Grant Thornton  
Rio Tinto Alcan  
State Street Global Advisors  
Transat A.T.  
Ville de Montréal

#### **Partenaires universitaires**

École Polytechnique de Montréal  
HEC Montréal  
McGill University  
Université Concordia  
Université de Montréal  
Université de Sherbrooke  
Université du Québec  
Université du Québec à Montréal  
Université Laval

Le CIRANO collabore avec de nombreux centres et chaires de recherche universitaires dont on peut consulter la liste sur son site web.

Les cahiers de la série scientifique (CS) visent à rendre accessibles des résultats de recherche effectuée au CIRANO afin de susciter échanges et commentaires. Ces cahiers sont écrits dans le style des publications scientifiques. Les idées et les opinions émises sont sous l'unique responsabilité des auteurs et ne représentent pas nécessairement les positions du CIRANO ou de ses partenaires.

*This paper presents research carried out at CIRANO and aims at encouraging discussion and comment. The observations and viewpoints expressed are the sole responsibility of the authors. They do not necessarily represent positions of CIRANO or its partners.*

ISSN 1198-8177

Partenaire financier  
Développement  
économique, Innovation  
et Exportation  
Québec 

# Dynamiques d'arbitrage entre écotaxe et permis d'émissions<sup>\*</sup>

Arnaud Z. Dragicevic<sup>†</sup>

## Résumé / Abstract

Ce papier propose trois analyses sur le mécanisme d'arbitrage entre écotaxes et permis d'émissions. Notre souhait est de comparer le niveau de l'écotaxe avec le prix du permis d'émissions par rapport au coût inhérent aux émissions. Nous redéfinissons les équations de calcul du profit des entreprises où nous injectons les paramètres d'intensité énergétique et de facteur d'émissions. Nous procédons à une étude statique puis à deux études dynamiques dans lesquelles nous adaptons la méthodologie de la dynamique des populations. Nos résultats mettent en exergue une simple règle d'arbitrage entre écotaxe et permis d'émissions, aussi bien dans le modèle statique que les modèles dynamiques. Dans l'incertitude, la règle détermine si le niveau de la taxe environnementale est sous- ou surévalué par rapport au prix du permis d'émissions. L'étude permet également 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.

*This paper proposes three analyses of the tradeoff mechanism between ecotax and carbon credit. Our wish is to compare the ecotax level with the carbon credit price given the cost inherent to emissions. We redefine the calculus equations of the firm profit, in which we inject the parameters of energy intensity and emission intensity. We proceed to one static and two dynamic studies, whither we adapt the methodology of population dynamics. Our results highlight a simple tradeoff rule between ecotax and carbon credit, both in the static and dynamic models. In uncertainty, the rule determines whether the level of 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.

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

---

<sup>\*</sup> 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 et Guy Meunier dont les commentaires ont fait progresser ce travail. Enfin, merci à Émilie Caldeira pour sa lecture du profit déséconomique. Les réserves habituelles s'appliquent ici.

<sup>†</sup> Université de Cergy-Pontoise, THEMA et CIRANO, courriel : [arnaud.dragicevic@cirano.qc.ca](mailto:arnaud.dragicevic@cirano.qc.ca)

## 1. Introduction

Les principes microéconomiques, issus de l'observation factuelle, décrivent l'objectif des entreprises comme étant 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 en présence 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.

Écotaxes et 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 quantités, 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 coexistent ou 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 contextes statique et dynamiques. En analyse

marginale, écotaxe et permis d'émissions reflètent tous 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 écotaxe et 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 physique 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.

---

<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 d'émissions et écotaxe (voir Lipietz 1998). De manière synthétique, nous considérons qu'une firme achète des permis d'émissions, à hauteur du dépassement du quota d'émissions autorisé par le régulateur, auprès d'une autre firme qui n'en a pas besoin.

Le profit est usuellement 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 les équations de calcul du profit des entreprises où nous injectons les paramètres d'intensité énergétique et de facteur d'émissions, empruntés à la littérature macroéconomique, que nous convertissons en variables microéconomiques. Nous procédons à ces transformations aussi bien pour le système d'écotaxes que celui des permis d'émissions. Les paramètres de l'entreprise représentative d'une économie ou d'un secteur industriel 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 considérons le profit comparé vis-à-vis des signaux-prix en procédant à une étude statique puis à deux études dynamiques. Notre méthodologie englobe l'ensemble du tissu industriel polluant. Pour étudier l'économie dans le temps, soit l'évolution de la population d'un secteur ou de tous les secteurs économiques, nous adaptons la méthodologie *ad hoc* de la dynamique des populations qui sont composées de firmes représentatives. Les économistes s'intéressent aux jeux évolutionnaires (Friedman 1991, 1996), pour ce qu'ils permettent de modéliser l'évolution des interactions répétées. Ainsi, dans le temps, les stratégies dominantes sont celles qui se répandent dans la population. Nos études mettent en exergue une simple règle d'arbitrage entre écotaxe et permis d'émissions, aussi bien dans les modèles statique que 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. Dans l'incertitude, la règle 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. Le niveau représente le seuil de financement réalisable, soit un outil d'aide à la décision pour amorcer des projets de recherche et développement. En effet, il convient pour le régulateur de préserver des incitations à l'innovation et à la recherche et développement, 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, les nouvelles équations de calcul du profit d'une firme considérée comme représentative (d'une économie ou d'un secteur), ainsi que la règle d'arbitrage entre écotaxe et permis d'émissions en 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 robustesse de nos résultats dans le contexte 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 par les facteurs population et 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.

**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 doivent être examinés ou coexistent. Soient respectivement (1) et (2) le profit déséconomique d'une firme représentative qui paye une écotaxe et le profit déséconomique d'une firme représentative qui achète un permis d'émissions

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

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

---

<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.

consommée ;  $\tau$  est le niveau de l'écotaxe ;  $\frac{c}{y}$  mesure l'intensité en carbone dans le système productif avec  $c$  le niveau 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 réglementaire des émissions ;  $\frac{\tilde{c}}{y}$  représente l'intensité des émissions par unité produite ou encore la sévérité réglementaire des émissions imposée par l'autorité publique ; 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. 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  $\frac{c}{y}$  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 leurs profits économiques, elles chercheront à minimiser leur profit déséconomique. Puisque les enjeux écologiques sont aujourd'hui autant considérés que les enjeux financiers, il apparaît opportun de les comparer en termes de performance environnementale. Introduire les paramètres d'intensité énergétique et d'intensité en émissions donne naissance à un nouveau modèle environnemental.

Le profit déséconomique ne s'interprète pas de la même manière que le profit économique. Alors que deux entreprises issues 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'internalisation des externalités négatives sera onéreuse. 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 en baisse ou 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  $\bar{\pi}_\tau > 0$ , nous avons  $(p - \frac{qk}{y})u - \tau c > 0 \Leftrightarrow (p - \frac{qk}{y})u > \tau c$ . Dans ce cas, le bénéfice par énergie consommée dépasse le coût induit par l'internalisation des émissions. Lorsque  $\bar{\pi}_\tau = 0$ , nous avons  $(p - \frac{qk}{y})u = \tau c$ . Le bénéfice généré par la consommation d'énergie est alors égal au coût d'internalisation des externalités négatives. Enfin, le déficit  $\bar{\pi}_\tau < 0$  correspond à  $(p - \frac{qk}{y})u < \tau c$  soit un bénéfice inférieur au coût des émissions<sup>3</sup>. Nous observons que  $\bar{\pi}_\tau > 0$

---

<sup>3</sup> Puisque la raison d'être du profit déséconomique est de mettre en place un point de repère pour comparer les performances environnementales des entreprises, il suffit de normaliser les consommations d'énergie et le montant des émissions par rapport au niveau de production afin de procéder à des comparaisons intrasectorielles.

équivalent à  $\tau < (p - \frac{qk}{y}) \frac{u}{c}$  ;  $\bar{\pi}_\tau = 0 \Leftrightarrow \tau = (p - \frac{qk}{y}) \frac{u}{c}$  ;  $\bar{\pi}_\tau < 0 \Leftrightarrow \tau > (p - \frac{qk}{y}) \frac{u}{c}$ . Le paramètre  $\frac{u}{c}$  correspond à l'intensité énergétique des émissions.

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

Si nous analysons maintenant les valeurs des émissions extrêmes, nous constatons que lorsque  $c \rightarrow \infty$ ,  $\lim_{c \rightarrow \infty} \tau = 0$  et inversement. 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 élevée.

Du côté de la bourse du carbone, 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 montre que  $\lim_{c \rightarrow \infty} t = 0$ ,  $\lim_{c \rightarrow 0} t = -(p - \frac{qk}{y}) \frac{u}{\bar{c}}$  et  $\lim_{c \rightarrow \bar{c}} t = \infty$ . 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 sur la bourse du carbone. Enfin, les émissions qui se conforment au seuil réglementaire font tendre le prix du permis d'émissions vers l'infini.

Suivant l'analyse économique standard, une meilleure performance économique signifie un profit économique plus élevé. Nous sommes alors dans le cas où  $\pi_\tau > \pi_c$ . *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 négocie les permis d'émissions, nous avons  $\bar{\pi}_\tau > \bar{\pi}_c$ . Cela veut dire que l'internalisation par les écotaxes génère une

performance environnementale moindre. Algébriquement, cela donne  $(t - \tau)c > t\tilde{c}$ . Réécrite, l'inégalité donne

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

Quand les émissions nettes sont positives ou  $c - \tilde{c} > 0$ , nous avons  $\tau > 0$ . Toutefois, si  $c - \tilde{c} < 0$ ,  $\tau < 0$ . Tableaux 1 et 2 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.

D'un point de vue purement économique, lorsque le niveau réel des émissions est inférieur au seuil réglementaire des émissions, la valeur de l'écotaxe qui permet de générer un profit économique supérieur à celui que la firme obtiendrait en achetant des permis d'émissions est négative. Cela se traduit par l'abandon du projet lié à l'éco-fiscalité ou encore par l'exonération des firmes de pénalités pour avoir émis. D'après notre analyse relative au marché du carbone, cette exonération se trouve être une subvention vis-à-vis des firmes qui achètent des permis d'émissions (Tableaux 1 et 2). Si ces-dernières font mieux que la contrainte décidée par le régulateur, elles vendront leurs excès de permis. Par contre, si la firme dépasse le seuil réglementaire des émissions ou  $c - \tilde{c} > 0$ , son profit économique est plus élevé avec une écotaxe lorsque  $\tau < t \frac{c - \tilde{c}}{c}$ . 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 par l'éco-fiscalité révèle un niveau de l'écotaxe inférieur au prix du permis d'émissions.*

Cette proposition énonce avant tout la nécessité d'une régulation hybride où prix et quantités sont considérés à parts égales. 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 est laxiste vis-à-vis des dommages, plus le niveau de l'écotaxe est petit. Dit autrement, un niveau de l'écotaxe modeste révèle des pratiques laxistes du régulateur à l'égard des dommages environnementaux.

L'expression (5) révèle qu'un moindre coût d'internalisation par l'écotaxe ne dépend que du prix du permis d'émissions, 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 est pris en compte. L'inégalité est finalement exemptée de toute considération environnementale. Si nous nous plaçons dans le modèle économique standard, elle signifie qu'une meilleure performance économique passe par l'éco-fiscalité. En revanche, si nous nous plaçons dans le cadre de la performance environnementale, l'inégalité dit qu'une piètre performance s'obtient en fixant un niveau d'écotaxe qui soit inférieur au produit entre le prix du permis d'émissions et le rapport entre les émissions nettes et les émissions réelles.

Si le profit déséconomique d'une firme avec écotaxe est inférieur au profit déséconomique avec permis d'émissions, soit une meilleure performance environnementale grâce à l'éco-fiscalité, 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 est positive. Si (6) se vérifie, le profit déséconomique est moins élevé avec les permis d'émissions. À l'opposé, lorsque  $c - \tilde{c} < 0$ , la vente des excès de permis s'opère à la bourse du carbone. Dans ce cas, il suffit que la valeur de  $\tau$  soit supérieure à une valeur négative.

**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 par l'éco-fiscalité révèle un niveau de l'écotaxe supérieur au prix du permis d'émissions.*

Lorsque  $\bar{\pi}_\tau < \bar{\pi}_c$ , la lecture au travers du modèle environnemental signifie qu'une bonne performance environnementale passe par un niveau d'écotaxe, relativement à la bourse du carbone, qui soit supérieur au prix du permis d'émissions multiplié par le rapport entre les émissions nettes et les émissions réelles.

Contrairement à la première proposition, Proposition 2 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 d'émissions. Toutes choses égales par ailleurs, le niveau de l'écotaxe devient alors supérieur au prix du permis d'émissions.

### 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 différents types d'entreprises connaissent différents niveaux 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  $\bar{\pi}_T$  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 usuelles de la dynamique du réplicateur (Hofbauer et Sigmund 1998). Étant donné que nous nous plaçons dans le modèle de la performance environnementale, le système devient

$$\begin{cases} \dot{x} = x(\langle \bar{\pi} \rangle - \bar{\pi}_T) \\ \dot{z} = z(\langle \bar{\pi} \rangle - \bar{\pi}_C) \end{cases}$$

où  $\langle \bar{\pi} \rangle = x\bar{\pi}_T + z\bar{\pi}_C$  est le profit déséconomique moyen sur le marché. Nous pouvons remplacer  $z$  par  $1-x$ , ce qui réduit le système de réplication en une seule équation différentielle telle que  $\dot{x} = x(1-x)(\bar{\pi}_C - \bar{\pi}_T)$ . 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 inutilisé.

Si nous supposons maintenant 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 les contextes statique et dynamique de sélection de marché. 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 de son niveau par rapport au dépassement en émissions du seuil réglementaire des émissions valorisé au 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  $\tau > t$ . Enfin, lorsque  $c \rightarrow \tilde{c}$ ,  $\lim_{c \rightarrow \tilde{c}} t \frac{c-\tilde{c}}{c} = 0$  soit  $\tau > 0$ . En cas d'émissions qui tendent vers zéro, il suffit au régulateur de mettre en place une écotaxe de valeur positive afin de permettre aux entreprises de 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 inférieure au prix du permis d'émissions. Enfin, lorsque les émissions tendent vers le niveau du seuil réglementaire fixé par le régulateur, la valeur de l'écotaxe doit simplement être positive.

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 relative à la production de la firme  $\tau y$  est égale à la juste part du seuil  $F$  sachant  $N$  firmes<sup>4</sup>. On peut aussi représenter (10) en tant que  $\tau = \frac{F}{Ny}$ , c'est-à-dire que le niveau de l'écotaxe est égal à la juste part divisée par le niveau de production de l'économie.

Lorsqu'on injecte cette identité dans (8), nous obtenons

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

Et donc

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

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 est supérieur au prix du permis d'émissions multiplié par le rapport entre émissions nettes et émissions totales dans l'économie.

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

---

<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.

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

Une fois encore, considérons les types d'entreprise  $T$  et  $C$ . Notons  $m_\tau$  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 soient soumises à l'éco-fiscalité. Nous supposons que  $m_\tau = xe^{-x}$  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.

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  $xe^{-x}$ . 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 dynamique stochastique donne

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

---

<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.

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

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

Contrairement aux résultats précédents qui sont indépendants de nombreux paramètres inclus dans le calcul du profit déséconomique, la dynamique de conversion montre que l'attractivité de l'écotaxe dans le modèle environnemental 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  $t\frac{c-\bar{c}}{c}$ .

La dynamique de conversion met donc en exergue un nouvel indicateur de performance environnementale, soit l'inverse de l'intensité des émissions. Pour un niveau d'émissions donné, on inspecte ici la quantité d'énergie utilisée pour l'atteindre. L'intensité énergétique des émissions révèle que plus la consommation d'énergie est élevée, plus la contrainte qui pèse sur le niveau de l'écotaxe à des fins de performance environnementale sera forte.

**Proposition 5.** *Plus la consommation d'énergie est élevée, plus le niveau de l'écotaxe est élevé.*

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

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

En cas de la dynamique de conversion, le seuil du fonds vert doit être supérieur à l'expression de droite dans (14) multiplié par la production globale. Nous observons que le seuil du fonds vert augmente lorsque le seuil réglementaire des émissions baisse. Par ailleurs, si nous examinons 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 produit de la marge de profit et du rapport entre consommation énergétique et émissions nettes doit être inférieur au prix du permis d'émissions.

OCDE (2007) suggère un niveau d'écotaxe progressif, qui serait inférieur à la juste part lors de sa mise en route. Bien que ce soit initialement insuffisant pour constituer la totalité du fonds, cette méthode est socialement plus juste que l'exonération fiscale de certaines entreprises. Par ailleurs, elle équivaut à instaurer une juste part fixe avec seuil de fonds progressif, c'est-à-dire croissant jusqu'à ce que le niveau du seuil visé ne soit atteint.

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 (Tableau 3). 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.** *Pour un niveau des 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  $\tau < \infty$ ,*

*l'état  $x = 0$  est stationnaire.*

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 (Figure 1). 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  $\tau > \infty$ . Enfin, quand les émissions tendent vers  $\tilde{c}$ ,  $\lim_{c \rightarrow \tilde{c}} \frac{e-1}{e} \left(p - \frac{qk}{y}\right) \frac{u}{c} + \frac{t}{e} \frac{c-\tilde{c}}{c} = \frac{e-1}{e} \left(p - \frac{qk}{y}\right) \frac{u}{\tilde{c}}$  soit  $\tau > \frac{e-1}{e} \left(p - \frac{qk}{y}\right) \frac{u}{\tilde{c}}$ .

**Proposition 8.** *Pour un niveau des 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  $\tau > \infty$ ,*
- *le seuil réglementaire et un niveau de l'écotaxe tel que  $\tau > \frac{e-1}{e} (p - \frac{qk}{y}) \frac{u}{c}$ ,*

*l'état  $x=1$  est stationnaire.*

Nous observons donc que la performance environnementale 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. Nous supposons que  $g(x) = \bar{\pi}_c - \bar{\pi}_\tau$  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 dérivation 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  $xe^{-x} = \Phi$ . Afin d'obtenir une équation sous la forme de  $\alpha e^\alpha$ , nous multiplions les deux côtés par  $\frac{-x}{x}$ . Nous obtenons donc  $-xe^{-x} = -\Phi$  et  $-x = W(-\Phi)$  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 (Figure 2). Si  $t < (p - \frac{qk}{y})\frac{u}{c - \tilde{c}}$ , il est instable (Figure 1).

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

$\lim_{c \rightarrow \infty} (p - \frac{qk}{y})\frac{u}{c - \tilde{c}} = 0$  soit  $t > 0$  ;  $\lim_{c \rightarrow 0} (p - \frac{qk}{y})\frac{u}{c - \tilde{c}} = -(p - \frac{qk}{y})\frac{u}{\tilde{c}}$  soit  $t > -(p - \frac{qk}{y})\frac{u}{\tilde{c}}$ . Enfin, lorsque  $c \rightarrow \tilde{c}$ ,  $\lim_{c \rightarrow \tilde{c}} (p - \frac{qk}{y})\frac{u}{c - \tilde{c}} = \infty (p - \frac{qk}{y})u$  soit  $t > \infty (p - \frac{qk}{y})u$  ou  $t > \infty$ . L'étude des émissions aux valeurs extrêmes nous ramène à la prochaine proposition.

**Proposition 10.** Pour un niveau des émissions 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  $t > -(p - \frac{qk}{y})\frac{u}{c}$ ,
- le seuil réglementaire et un prix du permis d'émissions tel que  $t > \infty$ ,

l'état  $x = x^*$  est stationnaire.

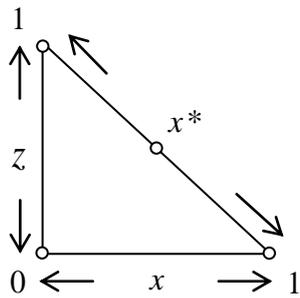


Fig. 1 Dynamique de  $x$  et  $z$   
pour  $\tau < \frac{u}{c}(p - \frac{qk}{y})$  ou  $t < \frac{u}{c-\bar{c}}(p - \frac{qk}{y})$

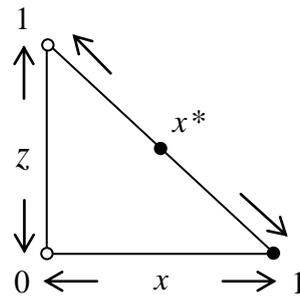


Fig. 2 Dynamique de  $x$  et  $z$   
pour  $\tau > \frac{u}{c}(p - \frac{qk}{y})$  ou  $t > \frac{u}{c-\bar{c}}(p - \frac{qk}{y})$

Tableau 3 Stabilité des équilibres

	$\tau < (p - \frac{qk}{y})\frac{u}{c}, t < (p - \frac{qk}{y})\frac{u}{c-\bar{c}}$	$\tau > (p - \frac{qk}{y})\frac{u}{c}, t > (p - \frac{qk}{y})\frac{u}{c-\bar{c}}$
$x = 0$	instable [○]	instable [○]
$x = x^*$	instable [○]	stable [●]
$x = 1$	instable [○]	stable [●]

## 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 4 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  $\tau \frac{1}{1+\Delta} \rightarrow 0$ .

Le même raisonnement appliqué à la formulation du fonds vert donne

$$F \frac{1}{1+\Delta} > Nyt \frac{c-\bar{c}}{c} \quad (25)$$

De nouveau, le ratio entre le niveau du fonds vert et le taux de croissance du prix du permis d'émissions nous permet de voir si le fonds est sous- ou surévalué par rapport au prix du permis compensé par l'économie à la bourse du carbone. Lorsque  $\Delta = 0$ , nous avons  $F \frac{1}{1+\Delta} = F$ , signifiant que le fonds est évalué à sa juste valeur. Si  $\Delta > 0$ , le ratio demeure  $F \frac{1}{1+\Delta}$ . Un ratio inférieur à un indique que le fonds est sous-évalué ; il est surévalué sinon.

## 6. Conclusion

Quand bien même il serait difficile pour le régulateur d'établir une hiérarchie entre écotaxe et permis d'émissions lorsqu'il décide de faire face au problème des externalités négatives, 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 le modèle environnemental, où l'entreprise cherche à minimiser son profit déséconomique.

Nos analyses révèlent qu'il existe pour le régulateur une simple règle d'arbitrage, de grande robustesse, entre écotaxe et permis d'émissions, permettant de minimiser le profit déséconomique. Mise en contexte d'incertitude, la règle permet de divulguer si l'écotaxe est sous- ou surévaluée par rapport au prix du permis d'émission. 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 écotaxes et permis d'émissions. Sa justification repose sur la distinction des sources et des émissions de pollution. De la sorte, les instruments de signal-prix sont

départagés en fonction des pollutions. 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 l'ensemble du tissu industriel. Pour ce faire, la règle d'arbitrage peut aider le régulateur dans ses choix de politiques publiques.

En définitive, si le souhait des autorités publiques est de financer un fonds de recherche et développement, afin d'amorcer une révolution technologique verte, notre étude permet aussi d'évaluer le niveau du fonds vert réalisable par la mise en place d'une éco-fiscalité relative au marché du carbone.

## Références

- 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.
- Lipietz, A. (1998), "Économie Politique des Écotaxes", Rapport du CAE 8, La Documentation Française, Paris.
- 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.
- OCDE (2007), "L'Économie Politique des Taxes Liées à 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.

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

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

$c / \tilde{c}$	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 4 Simulations en dollars du niveau de l'écotaxe relativement à  $\Delta$ , pour  $\tilde{c} = 100$  tonnes et  $t = 15$  :  $\tau = t(1 + \Delta) \frac{c - \tilde{c}}{c}$

$\Delta / c - \tilde{c}$	-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