

Incitation à innover et taxe environnementale : le rôle de la conscience écologique

Dorothée BRÉCARD^(*)

Université de Nantes,

Laboratoire d'Économie de Nantes - C3E, Mad-Erasme

1 Introduction

Les politiques d'environnement tendent-elles à réduire ou, au contraire, à améliorer la compétitivité des entreprises polluantes ? Ce débat fut initié dans les années 70 aux États-Unis. Les crises économiques que traversent actuellement les pays industrialisés, loin de l'effacer, ont renforcé la nécessité de clarification de cette question. Les articles publiés en 1995 sur ce sujet (Jaffe *et al.*, Porter *et al.*, Palmer *et al.*), les travaux menés par la Commission des Communautés Européennes (*Compétitivité, énergie, emploi et politiques d'environnement* [1994]) et les plus récents documents de l'OCDE [1995, 1996] en soulignent l'importance.

Ce débat est particulièrement ardu quand il s'agit de mettre en évidence que, au contraire de l'idée largement répandue, une charge fiscale supplémentaire, à l'instar de l'écotaxe européenne (CCE [1992]), conduirait les industriels à maintenir, voire à améliorer, leur position compétitive sur le marché international : en générant de nouvelles stratégies de différenciation et d'innovation des entreprises polluantes, une taxe environnementale crée des effets de structure sur les marchés, au côté de ses inévitables effets prix. En outre, la question soulevée ici conduit à s'interroger, plus généralement, sur les conséquences d'une taxe environnementale sur le bien-être de la société.⁽¹⁾ Ces effets sont pris en compte dans un modèle d'économie industrielle, inspiré de ce-

^(*) Je tiens à remercier Anne Epaulard et Paul Zagamé pour leurs précieux commentaires sur des versions antérieures de cet article. Je reste cependant seule responsable des erreurs qui pourraient subsister.

⁽¹⁾ L'exemple récent du refus d'implantation de l'entreprise DHL à Strasbourg illustre parfaitement l'arbitrage des « planificateurs » entre la compétitivité (d'une région) et la dégradation du bien-être des ménages (ici, par augmentation du bruit).

lui de Ulph [1993]. Sans développer⁽²⁾ ce modèle, nous présentons ici une mise en perspective des hypothèses retenues à chaque étape du jeu pour conclure sur leurs conséquences sur l'ampleur de l'incitation des entreprises à rechercher et développer une technologie propre et sur la sévérité de la politique environnementale.

Le cadre utilisé ici est celui de modèles de course à l'innovation d'une industrie composée de deux entreprises polluantes localisées dans deux pays différents qui ont conclu un accord les obligeant à utiliser le même instrument de politique d'environnement, une taxe sur les émissions de polluants, sans les contraindre sur le niveau de cette taxe. Dans ces modèles, la taxation, en imposant un coût supplémentaire de production, favorise la réduction de la pollution non seulement grâce à la diminution de la production, mais aussi par la découverte d'une technologie moins polluante. En effet, lorsqu'une entreprise découvre une technologie moins consommatrice d'énergie, la protection de cette découverte par un brevet lui octroie un avantage de coût sur sa concurrente. La réduction de ses coûts de contrôle de la pollution (dus à la réglementation) renforce la compétitivité coût de l'entreprise innovante et lui permet d'offrir une nouvelle qualité du bien, plus écologique, améliorant sa compétitivité structurelle. La taxe environnementale, par ses effets sur la compétitivité, constitue ainsi une incitation à la R&D dans le domaine de l'environnement. Le choix de la taxe optimale par les planificateurs dépend donc de ses effets sur les profits réalisés sur le marché du bien par l'entreprise innovante et sa concurrente, des choix d'investissement, de la sensibilité écologique des consommateurs et de ses impacts sur la pollution et le bien-être des consommateurs.

Nous ne nous intéressons pas, dans cet article, aux stratégies de délocalisation des entreprises vers des pays où la réglementation environnementale est moins sévère ou inexistante. Il s'agit d'un réel problème pour les régulateurs puisque la délocalisation aboutirait à une perte d'emplois assortie d'aucune amélioration de l'environnement (dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique). Cependant, les études économétriques tendent à infirmer ou relativiser l'hypothèse de délocalisation due à la réglementation environnementale (OCDE [1996]). De plus, l'étude de ce phénomène de délocalisation constitue un champ de recherche à part entière (voir, par exemple, Markusen [1993]). C'est pourquoi, nous nous restreignons ici aux stratégies de R&D environnementale des firmes.

Nous excluons également la possibilité, pour les gouvernements, de taxer les produits à l'importation dans le but de favoriser l'entreprise

⁽²⁾ Les modèles dont l'ossature est présentée dans cet article sont largement développés dans Brécard [1996].

domestique. Nous supposons ainsi que les échanges s'opèrent librement entre les deux pays et que le jeu des taxes environnementales n'est en rien entravé.

Dans ce cadre, nous construisons un jeu en trois étapes entre les régulateurs et les entreprises de deux pays (cf. figure 1).

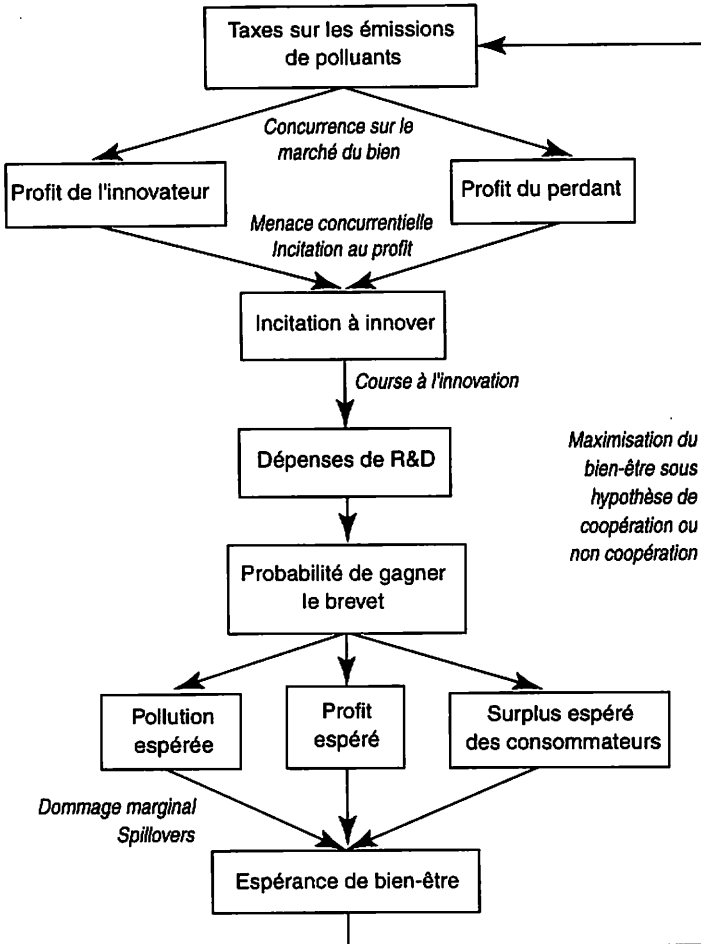


Figure 1: Mécanismes du jeu

a) Première étape

À la première étape, les planificateurs décident des niveaux des taxes coopératives ou non coopératives optimales. Dans le premier cas, ils fixent la taxe nationale sur les émissions polluantes de l'unique entreprise domestique qui maximise le bien-être de leurs pays. S'ils

coopèrent, leur objectif devient celui d'un planificateur centralisé, qui maximise le bien-être joint des deux pays (cf. section 4).

b) Deuxième étape

Connaissant les niveaux des taxes, le duopole se livre à une course à l'innovation dans le but de développer une nouvelle technologie plus économe en énergie que celle en cours d'utilisation. Les deux entreprises sont incitées à adopter cette technologie propre grâce à la taxe (cf. section 3). Les dépenses engagées dans la R&D déterminent de manière stochastique qui des deux concurrents bénéficie de l'utilisation de la découverte au terme de la course (Beath, Katsoulacos et Ulph [1989]). Protégée par un brevet à durée de vie infinie, l'innovation confère au duopole la volonté d'améliorer ses profits (l'incitation au profit) et de bénéficier d'une position dominante sur le marché du bien (la menace concurrentielle).

c) Troisième étape

À l'issue de la course au brevet, connaissant l'identité du bénéficiaire de l'innovation, les entreprises sont confrontées sur le marché du bien. Leur comportement sur le marché dépend de la sensibilité des consommateurs à la qualité du nouveau produit, moins polluant (cf. section 2). Des consommateurs totalement insensibles à la qualité écologique du nouveau produit assimilent le produit « standard », issu de l'ancienne technologie, et le produit « vert », issu de la nouvelle technologie, à des produits parfaitement substituables. Sur ce marché homogène, nous pouvons supposer que les entreprises se livrent à une concurrence à la Cournot ou rivalisent par les prix.⁽³⁾ Cependant, la plupart des enquêtes auprès des consommateurs (cf. Dobré [1995]) laisse penser que leur majorité est sensible à la qualité écologique des produits. Dans le cadre général d'un modèle de différenciation verticale, les produits « verts » et « standards » ne sont alors plus parfaitement substituables. Il convient donc d'adopter l'hypothèse traditionnelle de choix des prix comme variable stratégique des entreprises.

Le jeu est résolu de manière inductive afin de déterminer l'équilibre de Nash de chaque sous jeu et ainsi l'équilibre de Nash du jeu (Selten [1975]). L'étape de la concurrence sur le marché du bien conditionne ainsi le déroulement de la course à l'innovation puis, conjointement avec cette dernière, le choix des taxes optimales. C'est pourquoi, les hypothèses adoptées à cette dernière étape du jeu déterminent fondamentalement les politiques d'environnement préconisées par ce type de modèle. Nous

⁽³⁾ Voir Dos Santos Ferreira [1991] et d'Aspremont, Dos Santos Ferreira et Gérard-Varet [1991] pour une comparaison de la concurrence à la Cournot et à la Bertrand.

nous attachons, dans la prochaine section à discuter de ces hypothèses et de leurs conséquences sur la concurrence entre les deux entreprises sur le marché du bien. Après avoir décrit aux sections 3 et 4 la concurrence par l'innovation et la politique environnementale optimale, nous donnons, à la section 5, les conclusions de nos modèles.

2 Comportements sur le marché du bien

La concurrence sur le marché du bien confronte deux entreprises localisées dans deux pays différents. Le duopole produit avec un coût unitaire de production hors taxe c indépendant du niveau des émissions (et donc de la technique de production utilisée). L'étude de *Best Available Technologies* (Ereco [1994]) montre que, moins polluantes, elles permettent, pour la plupart, malgré un coût fixe plus élevé que les technologies en cours d'utilisation, une économie de coûts variables aux entreprises les adoptant. Nous devrions donc supposer, dans notre modèle, une réduction du coût unitaire de production à la suite de la mise en œuvre de la nouvelle technologie (moins polluante). Cependant, une telle hypothèse alourdirait inutilement leur résolution analytique. L'incitation à innover des entreprises bénéficierait de cette économie de coûts qui pourrait ainsi, partiellement, relayer la taxe environnementale. Nous supposons donc simplement que le coût unitaire de production hors taxe c est constant. Ainsi, la course à l'innovation, qui serait déclenchée par un différentiel de coût hors taxe, est uniquement provoquée, sous cette hypothèse d'uniformité du coût, par la taxe sur les émissions de polluants.

Chaque unité de production génère des émissions polluantes ou, de manière équivalente, une certaine consommation d'énergie.⁽⁴⁾ L'intensité énergétique de la production, ou encore le ratio d'émissions par unité produite, est notée e_i ($i = s, v$). Le duopole symétrique émet e_s unités de polluants par unité produite. Une technologie plus propre permet à l'entreprise novatrice de réduire ses émissions de e_s à e_v .⁽⁵⁾ Les émissions e_i de chaque entreprise sont taxées au prix⁽⁶⁾ t_k ($k = 1, 2$) fixé par le planificateur du pays dans lequel elles sont actives. Quel que soit le comportement des planificateurs, décidant ou non de coopérer, la taxe

⁽⁴⁾ Les émissions de polluants ne peuvent être mesurées directement « à la sortie » de l'entreprise. Pour les mesurer, on applique généralement un ratio d'émission à chaque type d'énergie utilisée (voir Breuil [1992]).

⁽⁵⁾ Nous utilisons l'indice s pour « standard », v pour « vert ».

⁽⁶⁾ Il s'agit d'un prix et non d'un taux de taxe car la taxe t est appliquée au volume d'énergie consommée et non à sa valeur. Le parallélisme entre consommation d'énergie et émissions polluantes n'existe que dans le cadre de la définition choisie pour la taxe.

est la même pour les deux pays car le duopole est supposé homogène avant la course. La comparaison des effets de la politique nationale et étrangère sur le comportement de l'entreprise domestique, par le biais de ses profits, nous amène néanmoins à différencier les deux taxes dans la recherche de l'équilibre de Nash de chaque sous jeu. En notant y_k la production de l'entreprise k , p_k son prix de vente, t_k la taxe qu'elle paye et e_i son ratio d'émissions, nous pouvons ainsi, sous les hypothèses précédentes, définir son profit π_k :

$$\pi_k = (p_k - c - t_k e_i) y_k, \quad k \in \{1, 2\}, i \in \{s, v\}. \quad (1)$$

À l'issue de la course à l'innovation, si les deux entreprises restent actives, l'une produit un produit « vert » en utilisant une technologie propre tandis que sa concurrente, qui continue à utiliser l'ancienne technologie, offre un produit « standard ». ⁽⁷⁾ Le comportement du duopole sur le marché est conditionné par les préférences des consommateurs vis-à-vis de ces produits : indifférents à leurs conséquences sur l'environnement, ils les considèrent comme parfaitement substituables ; au contraire, sensibles à leurs qualités écologiques, ils les considèrent comme différenciés. Les goûts des consommateurs engendrent différentes stratégies des entreprises sur le marché et ont des répercussions sur leur compétitivité structurelle.

Supposons, à l'instar de Singh et Vives [1984], qu'il existe un continuum de consommateurs qui peuvent demander les deux produits différenciés ou un bien numéraire issu d'un secteur de production concurrentiel. Ces consommateurs basent leur choix sur la maximisation de leur fonction d'utilité séparable, qui est une fonction linéaire du bien numéraire. Dans ce cadre, nous pouvons mener une analyse en équilibre partiel dans lequel le consommateur choisit les quantités y_1 et y_2 respectivement vendues aux prix p_1 et p_2 en maximisant $U(y_1, y_2) - p_1 y_1 - p_2 y_2$. La fonction d'utilité U est supposée quadratique et strictement concave ⁽⁸⁾ :

$$U(y_1, y_2) \quad (2)$$

$$= \alpha_1 y_1 + \alpha_2 y_2 - \frac{1}{2} (\beta_1 y_1^2 + 2\gamma y_1 y_2 + \beta_2 y_2^2), \quad \alpha_i > 0, \beta_i > 0, i = 1, 2.$$

⁽⁷⁾ La perdante peut néanmoins, sous certaines conditions, cesser toute production à la suite de l'adoption de la technologie propre par sa rivale. L'innovation est alors radicale.

⁽⁸⁾ Le consommateur détermine ses consommations optimales des produits y_1 et y_2 et du numéraire x en maximisant son utilité $Y(y_1, y_2) + x$ sous sa contrainte budgétaire $p_1 y_1 + p_2 y_2 + x \leq R$ (R étant son revenu). Le programme peut ainsi être réduit à la maximisation de l'écart entre l'utilité associée à la consommation de nos deux produits et aux dépenses qu'elle engendre, en négligeant le revenu R de l'analyse.

La stricte concavité de la fonction d'utilité impose que $\beta_1\beta_2 - \gamma^2$ soit positif.

Les fonctions de demande inverses des consommateurs peuvent alors être définies comme des fonctions linéaires des quantités achetées de chacun des produits :

$$p_i = \alpha_i - \beta_i y_i - \gamma y_j \quad , \quad i, j = 1, 2, \quad i \neq j. \quad (3)$$

Le système de demande peut aisément être inversé, en supposant que la quantité maximale consommée de chaque produit $\alpha_i\beta_j - \alpha_j\gamma$ est positive. Dans ce cadre, γ est l'indicateur de dépendance des produits. Ainsi, le produit «vert» et le produit «standard» sont substituables lorsque $\gamma > 0$ et indépendants lorsque $\gamma = 0$. Sous ces hypothèses, la condition de complémentarité stratégique de Milgrom et Roberts [1990] est satisfaite ($\partial^2 \pi_i / \partial y_i \partial y_j \geq 0$) et garantit l'existence des équilibres en prix et en quantités⁽⁹⁾. En revanche, lorsque $\gamma < 0$, les produits sont complémentaires. La parfaite substituabilité des deux produits conduit à imposer $\alpha_1 = \alpha_2$ et $\beta_1 = \beta_2 = \gamma$. Plus généralement, lorsque $\alpha_1 = \alpha_2$, $\gamma^2 / \beta_1\beta_2$ indique le degré de différenciation des produits. Défini sur l'intervalle $[0, 1]$, il prend la valeur 0 pour des biens indépendants et 1 pour des biens substituables. Dans ce dernier cas, les deux entreprises du duopole se font concurrence sur un marché homogène.

Dans cet article, nous traitons deux cas polaires de préférence des consommateurs.

a) Premier cas

Les consommateurs sont insensibles à la qualité écologique du nouveau produit. Le marché du bien est alors homogène et «le prix est nécessairement le même pour l'un et pour l'autre» des deux produits (Cournot [1838]). Nous utilisons alors simplement une fonction de demande inverse linéaire du prix du marché et supposons le duopole en concurrence à la Cournot. Nous adoptons donc les hypothèses sur les fonctions de demande inverses (3): $\alpha_1 = \alpha_2$ et $\beta_1 = \beta_2 = \gamma$ et posons :

$$p = a - \alpha \sum_{i=1}^2 y_i \quad , \quad a > 0, \quad \alpha > 0. \quad (4)$$

⁽⁹⁾ Soit D_i la fonction de demande adressée à la firme i et Δ_i la fonction de demande inverse qui lui est adressée, pour des coûts unitaires de production nuls, les équilibres en prix p^* et en quantité y^* sont tels que :

$$p_i^* \in \arg \max [p_i D_i (p_i, p_j^*)]$$

et

$$y_i^* \in \arg \max [y_i \Delta_i (y_i, y_j^*)]$$

avec $i \neq j$.

b) Second cas

Les consommateurs préfèrent tous le produit « vert » mais diffèrent dans leur disponibilité à en payer le prix (*i.e.* leur conscience écologique). Le marché du bien est alors différencié et les prix des produits diffèrent. Dans ce cas, nous reprenons les hypothèses standards des modèles de différenciation par la qualité (*i.e.* verticale) dans lesquels les consommateurs sont caractérisés par leur goût pour la qualité (Motta et Thisse [1993]). Nous supposons ainsi que le duopole se concurrence par les prix (Bertrand [1883]) et que la différenciation des deux produits apparaît à la fois dans la constante des fonctions de demande ($\alpha_1 \neq \alpha_2$) et dans le degré de différenciation $\gamma^2/\beta_1\beta_2$ strictement inférieur à 1.

La sensibilité des consommateurs à la qualité écologique des produits est représentée par une fonction d'utilité $u(\theta)$ définie par la différence entre la disponibilité à payer le produit de qualité $q_i, \theta q_i$, et le prix d'achat de ce produit p_i ($i = s, v$). Le paramètre θ , distribué uniformément sur l'intervalle $[0, \bar{\theta}]$, avec une fonction de répartition unitaire, représente la sensibilité écologique des consommateurs. Il est de plus supposé que le bien est indivisible, chaque consommateur pouvant acheter une seule unité du bien ou ne pas consommer de ce bien. Nous pouvons, dans ce cadre, définir les fonctions de demande suivantes :

$$\begin{cases} y_v &= \bar{\theta} - \theta_{sv} \\ y_s &= \theta_{sv} - \theta_s \end{cases} \quad (5)$$

avec $\theta_s = p_s/q_s$ le consommateur indifférent entre l'abstinence et la consommation du produit « standard » de qualité q_s au prix p_s , et $\theta_{sv} = (p_v - p_s)/(q_v - q_s)$ le consommateur indifférent entre le produit « standard » au prix p_s et le produit « vert », de qualité q_v ($q_v > q_s$) au prix p_v ($p_v > p_s$). L'inversion des fonctions de demande (5) conduit aux fonctions suivantes :

$$\begin{cases} p_s &= q_s (\bar{\theta} - y_s - y_v) \\ p_v &= q_v (\bar{\theta} - y_v) - q_s y_s. \end{cases} \quad (6)$$

Les fonctions de demande inverses (3) sont ainsi, avec différenciation verticale des produits, paramétrées par :

- $\alpha_s = \bar{\theta}q_s$ la plus forte disponibilité à payer pour le produit « standard » ;
- $\alpha_v = \bar{\theta}q_v$ la plus forte disponibilité à payer pour le produit « vert » ;
- $\beta_s = \gamma = q_s$ la qualité du produit « standard » et
- $\beta_v = q_v$ la qualité du produit « vert ».

La préférence pour le produit « vert » se traduit donc par une disponibilité maximum à payer ce produit plus élevée que pour le produit « standard » et un degré de différenciation mesuré par la qualité relative q_s/q_v . La qualité d'un produit étant définie par l'inverse des émissions que chacune de ses unités produites génère, l'indice de différenciation est simplement le rapport des ratios d'émissions des deux entreprises (*i.e.* l'économie d'énergie relative autorisée par la nouvelle technologie e_v/e_s).

Dans le cadre général d'analyse de Singh et Vives [1984], lorsque la production s'opère à coût marginal de production constant, la concurrence à la Cournot avec produits substituables (complémentaires) est duale de la concurrence à la Bertrand avec produits complémentaires (substituables). Le duopole choisit, dans une étape préliminaire, la variable stratégique à adopter sur le marché (les prix ou les quantités) pour se faire ensuite concurrence sur le marché, sans pouvoir dévier de son engagement initial. La stratégie dominante de chacune des entreprises est alors de choisir une stratégie en quantité (en prix) lorsque les produits sont substituables (complémentaires). Les hypothèses utilisées par Singh et Vives sont en réalité très restrictives (cf. d'Aspremont *et al.* [1991]) ; elles présentent néanmoins l'avantage de généraliser les hypothèses des modèles que nous développons en leur donnant le statut de cas particuliers.

Dans le modèle de différenciation verticale, nous supposons que la concurrence porte sur les prix. En revanche, dans le modèle avec prix unique, nous supposons que la concurrence porte sur les quantités et que le prix s'ajuste de façon à équilibrer le marché du bien. Ainsi, même dans le cas limite où la qualité du produit « vert » est très proche de la qualité du produit « standard », les deux modèles diffèrent par la fonction de réaction des entreprises aux quantités produites par leur concurrente : alors que la concurrence à la Cournot oblige une entreprise à diminuer la quantité produite lorsque la quantité concurrente augmente, la concurrence à la Bertrand conduit à un comportement opposé du duopole, réagissant à une augmentation de la quantité concurrente par un accroissement de sa propre production. Ces comportements stratégiques conduisent au résultat bien connu selon lequel les prix de Bertrand sont plus faibles que les prix de Cournot mais les quantités de Bertrand plus élevées que celles de Cournot. Cette divergence des prix est d'autant plus importante que les produits sont homogènes. C'est pourquoi, nous étudions la sensibilité des résultats sur l'incitation à innover des entreprises et les politiques optimales de taxation des émissions au mode de concurrence retenue (en substituant l'hypothèse de concurrence à la Cournot par celle de concurrence à la Bertrand). Nous faisons ainsi le lien entre les modèles où nous supposons les consommateurs indifférents

à la qualité écologique des produits et ceux où nous les supposons sensibles à cette caractéristique des produits.

Nous ne souhaitons pas ici développer plus en détail les comportements stratégiques des entreprises sur le marché du bien homogène ou différencié (cf. Brécard [1996] pour une telle analyse). Notons simplement que, quel que soit le type de concurrence envisagée, le profit de l'innovateur diffère nécessairement de celui de l'entreprise continuant à utiliser l'ancienne technologie, et ce en raison de leurs coûts de contrôle de la pollution divergents. Au terme de la première étape du jeu, l'entreprise i bénéficie ainsi d'un profit π_i^w si elle a gagné la course à l'innovation et π_i^l si elle a perdu. Ces perspectives de profits, associées aux profits précédant l'innovation π_i , permettent à l'entreprise d'évaluer son incitation à participer à la course au brevet et, ainsi, la somme à investir dans la R&D environnementale. Ce choix constitue la deuxième étape du jeu.

3 Les choix d'investissement en R&D

Le modèle de course au brevet utilisé à cette étape du jeu ne représente qu'une faible partie de la littérature économique traitant des innovations technologiques (cf. Brécard [1996]). Il offre l'avantage d'une relative simplicité et surtout permet l'analyse de l'incitation à innover des entreprises en fonction des paramètres technologiques, structurels et réglementaires caractérisant l'industrie. Au contraire des modèles du type de celui de d'Aspremont et Jacquemin [1988], c'est la séparation du jeu en deux étapes, la concurrence sur le marché et la concurrence pour la recherche et le développement d'une innovation, qui permet l'analyse des deux forces incitatives mises en évidence par Beath *et al.* [1989] et la compréhension du comportement des entreprises polluantes, en particulier face à l'introduction d'une taxe sur leur consommation d'énergie.

La concurrence pour l'innovation est principalement caractérisée par l'incertitude pesant sur les entreprises : elles ne connaissent ni la date de succès de leurs concurrents (l'incertitude de marché) ni celle de leur propre succès (l'incertitude technologique) lorsqu'elles décident d'investir dans la R&D. Une course au brevet est ainsi initiée par l'achat d'une date de succès τ par chaque entreprise et prend fin lorsque l'une des entreprises en course arrive à l'aboutissement de son programme de R&D et gagne ainsi un brevet à durée de vie supposée infinie (Loury [1979], Lee et Wilde [1980]).

La date de succès d'un programme de R&D est supposée distribuée exponentiellement. La probabilité à la date $t = 0$ pour une entreprise d'introduire l'innovation avant t si aucun concurrent n'en dispose déjà

est ainsi définie par :

$$P(\tau(x) \leq t) = 1 - e^{-xt} \quad (7)$$

avec x le taux de hasard tel que $x dt$ est la probabilité d'apparition de l'innovation à la date $t + dt$ si elle n'est pas apparue à la date t , dt étant très faible.

Comme Ulph [1993], nous supposons que l'investissement en R&D $\rho(x)$ permettant d'acheter le taux de hasard x est une fonction quadratique de ce taux :

$$\rho(x) = x^2. \quad (8)$$

Les dépenses de R&D sont donc supposées à rendements décroissants sur l'ensemble des valeurs de x .

L'espérance de profit $V_1(x_1, x_2)$ de l'entreprise 1 est la somme actualisée de ses profits π_1^W/r , si elle est la première à innover, π_1^1/r , si elle perd la course et π_1 , si aucune des entreprises n'introduit l'innovation⁽¹⁰⁾, dont sont déduits les coûts de R&D $\rho(x_1)$. Il s'écrit donc, pour un taux d'intérêt r :

$$V_1(x_1, x_2) = \frac{\frac{\pi_1^W}{r}x_1 + \frac{\pi_1^1}{r}x_2 + \pi_1 - x_1^2}{x_1 + x_2 + r}. \quad (9)$$

L'entreprise détermine ses dépenses de R&D optimales par la maximisation, par rapport au taux de hasard x , de son profit espéré (9). La meilleure réponse de l'entreprise 1 au taux de hasard x_2 de sa concurrente est caractérisée par :

$$x_1^2 - 2(x_1 + x_2 + r)x_1 + \frac{\pi_1^w - \pi_1^1}{r}x_2 + (\pi_1^w - \pi_1) = 0. \quad (10)$$

Ce programme a une solution unique, finie et positive.⁽¹¹⁾ Cette solution se situe entre les deux cas polaires suivants, mis en évidence par Beath *et al.* [1989].

⁽¹⁰⁾ π_1 et π_2 sont les profits instantanés et π_1/r et π_2/r les flux de profits actualisés du gagnant et du perdant.

⁽¹¹⁾ Soit $P(x_1)$ le polynôme (10), on vérifie que

$$P(0) > 0; \quad P'(x_1) < 0; \quad \lim_{x_1 \rightarrow +\infty} P(x_1) = -\infty.$$

a) Premier cas

Lorsque l'entreprise concurrente n'investit pas dans le programme de R&D, la firme a pour seule incitation des perspectives de profits plus élevés : c'est l'incitation au profit ($\pi_1^w - \pi_1$) qui la conduit à investir.⁽¹²⁾

b) Second cas

En revanche, si l'entreprise 2 décide d'investir un montant infiniment élevé dans la R&D, l'entreprise 1 a pour seule incitation la crainte de perdre la course face à une forte concurrence : c'est la menace concurrentielle ($\pi_1^w - \pi_1^1$) qui détermine alors son taux de hasard.⁽¹³⁾

Nous supposons, à l'instar de Ulph [1993], que le taux d'intérêt r est très faible ($r^2 \approx 0$). Sous cette hypothèse, la fonction de réaction de l'entreprise 1 peut se réécrire (en posant $X_i = rx_i$):

$$(\pi_i^w - \pi_i^1) X_j = X_i (X_i + 2X_j). \quad (11)$$

La symétrie des entreprises leur confère une égalité des chances face à la course à l'innovation. Le taux de hasard d'équilibre est alors le tiers de la menace concurrentielle :

$$X_1 = X_2 = \frac{\pi^w - \pi^1}{3} \quad (12)$$

avec $\pi^w = \pi_1^w = \pi_2^w$ et $\pi^1 = \pi_1^1 = \pi_2^1$.

4 Les politiques environnementales optimales

L'objectif d'un planificateur est la maximisation du surplus de la société. La fonction de bien-être social (W) est communément définie comme la somme du surplus des consommateurs (S) et des producteurs (Π) diminuée des dommages environnementaux (D). La taxe payée par l'entreprise nationale ne représentant pas un coût social pour la société, seul le coût unitaire de production hors taxe est pris en compte dans l'analyse de l'optimalité⁽¹⁴⁾.

⁽¹²⁾ On a alors : $x_1 = -r + \sqrt{(\pi_1^w - \pi_1) + r^2}$.

⁽¹³⁾ Dans ce cas, $x_1 = \frac{\pi_1^w - \pi_1^1}{2r}$.

⁽¹⁴⁾ Baumol et Oates [1988] déterminent ainsi la taxe optimale de second rang en maximisant la différence entre la valeur de la production d'un monopole et le coût social, incluant les dommages dus à la pollution :

$$W = \int_0^y f(y) dy - c(y, a) - D(s)$$

Le surplus des consommateurs diffère selon l'hypothèse adoptée sur leurs préférences. Sur un marché homogène, il est déduit de leur disponibilité à payer le bien lorsque les entreprises en offrent une quantité optimale $Y^* = y_1^* + y_2^*$. La fonction de demande inverse (4) nous permet de le définir par :

$$S^* = \int_0^{Y^*} p(q) dq - p(Y^*) Y^* = \frac{\alpha}{2} Y^{*2}. \quad (13)$$

En revanche, sur un marché différencié, caractérisant les consommateurs par leur utilité $u(\theta)$, le surplus des consommateurs est déduit de l'utilité des consommateurs de produits « vert » et « standard » :

$$S_i^* = \int_{\underline{\theta}_i}^{\bar{\theta}_i} u(\theta) d\theta = \frac{q_i y_i^*}{2} [\bar{\theta}_i + \underline{\theta}_i - 2p_i^*] \quad , \quad i = s, v \quad (14)$$

avec $y_i^* = \bar{\theta}_i - \underline{\theta}_i$ la demande en produit i , $\bar{\theta}_v = \bar{\theta}$, $\underline{\theta}_v = \bar{\theta}_s = \theta_{sv}$ et $\underline{\theta}_s = \theta_s$. Le surplus total s'écrit donc $S^* = S_s^* + S_v^*$.

Sous ces deux hypothèses, nous supposons que les consommateurs se répartissent équitablement entre les deux pays. Chaque pays bénéficie ainsi de la moitié du surplus de l'ensemble des consommateurs. (15)

Le surplus des entreprises correspond à leurs profits hors taxe :

$$\begin{aligned} \Pi_i^* &= [p(y_1^* + y_2^*) - c] y_i^* \\ &= \pi_i^* + t_i e_k y_i^* \quad , \quad i \in \{1, 2\}, \quad k \in \{s, v\} \end{aligned} \quad (15)$$

avec π_i^* le profit d'équilibre de l'entreprise i , soit π_i^{*W} si elle gagne la course à l'innovation et π_i^1 si elle la perd.

La fonction de dommage environnemental est généralement supposée croissante et convexe avec le niveau de pollution. Par soucis de simplification, nous retenons une fonction de dommage linéaire et définissons ainsi le dommage marginal :

$$D'_i (e_k y_i^* + \sigma e_{k'} y_{j'}^*) = \delta \quad , \quad k, k' \in \{s, v\}, \quad i \neq j, \quad k \neq k' \quad (16)$$

avec $f(y)$ la disposition à payer le produit par la société, $c(y, a)$ le coût de production et de dépollution (hors taxation) et $D(s)$ le dommage social associé à un niveau d'émissions polluantes s .

(15) Cette hypothèse est conforme au cadre de nos modèles, dans lesquels les pays ne se distinguent en rien avant l'adoption de la nouvelle technologie. Lorsque le marché est différencié, cela revient en fait à supposer que, dans chaque pays, les consommateurs se répartissent sur l'espace des goûts $[0, \bar{\theta}]$ et que la population est la même dans les deux pays. Sous cette hypothèse, la taille du marché est simplement doublée et les conclusions restent inchangées.

avec σ le degré de *spillovers* ($0 \leq \sigma \leq 1$) défini comme la part de la pollution du pays j subie dans le pays i étudié, et inversement.

L'incertitude pesant sur l'issue de la course oblige les planificateurs à calculer leurs espérances de bien-être. Soit W_i^W le bien-être du pays i en cas d'innovation de l'entreprise domestique et W_i^1 son bien-être en cas de défaite, l'espérance de la valeur actualisée du bien-être de ce pays est défini, avec un faible taux d'actualisation τ , par :

$$W_i = \frac{W_i^W X_i + W_i^1 X_j - X_i^2}{X_1 + X_2}, \quad i \in \{1, 2\}, \quad i \neq j. \quad (17)$$

En l'absence de coopération, l'objectif du planificateur de chaque pays est la maximisation de ce bien-être W_i grâce à la taxe t_i . Chaque entreprise bénéficie d'une probabilité conditionnelle de réussite de 1/2. La condition d'optimalité s'écrit alors :

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_1}{\partial t_1} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W_1^W}{\partial t_1} + \frac{\partial W_1^1}{\partial t_1} \right) + \frac{1}{4X_1} \left(\frac{\partial X_1}{\partial t_1} - \frac{\partial X_2}{\partial t_1} \right) (\Delta W_1 - mc_1) \\ &\quad - \frac{1}{2} \frac{\partial X_2}{\partial t_1} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

avec $\Delta W_1 = W_1^W - W_1^1$ et $mc_1 = \pi_1^W - \pi_1^1$.

En revanche, la coopération des deux planificateurs se traduit par la maximisation de l'espérance de leur bien-être joint $W_1 + W_2$ grâce à l'unique taxe coopérative. La condition de maximisation de leur bien-être joint s'écrit (avec $t = t_1 = t_2$) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial (W_1 + W_2)}{\partial t} &= \frac{\partial W^W}{\partial t} + \frac{\partial W^1}{\partial t} - \frac{\partial X}{\partial t} \\ &= 0. \end{aligned} \quad (19)$$

En concurrence pure et parfaite, la taxation optimale correspondrait à la taxe pigouvienne, le dommage marginal δ , en cas de non-coopération, auquel on ajoute les *spillovers* $\delta\sigma$ en cas de coopération (cf. Baumol et Oates [1988], chapitre 4). À l'externalité que constituent les *spillovers*, internalisée en cas de coopération, s'ajoutent ici les imperfections du marché se traduisant, à l'étape de la production, par la concurrence oligopolistique et, à l'étape de la R&D, par les interactions stratégiques des entreprises. La taxe environnementale, dont l'objectif est de maximiser le bien-être, ne peut donc que diverger de la taxe pigouvienne. À son rôle de correction des dommages environnementaux s'ajoute en effet l'arbitrage entre surplus des consommateurs et profits

des entreprises, lié à l'imperfection de la concurrence. L'incertitude sur l'issue de la course à l'innovation constitue un élément supplémentaire à prendre en compte dans la détermination de la taxe optimale.

Selon les comportements des planificateurs, coopérant ou non, et les préférences des consommateurs, nous nous attachons, dans la section suivante, à caractériser l'incitation à innover des entreprises et les politiques environnementales optimales.

5 Conclusion

Proposition 1 *Sur un marché homogène, la taxe environnementale est nécessaire à l'engagement des entreprises polluantes dans la recherche et le développement d'une technologie propre. En revanche, sur un marché différencié par la qualité, le duopole est incité à investir dans la course à l'innovation en dehors de toute politique d'environnement.*

Cette proposition découle de l'absence d'incidence de l'adoption de cette nouvelle technologie sur le coût unitaire de production hors taxe et sur la demande dans le cas homogène. Avec différenciation des produits, en servant la part des consommateurs les plus (moins) sensibles à l'environnement en produit « vert » (« standard »), chaque entreprise améliore son profit. De plus, le produit « vert » bénéficie d'une demande plus forte (et d'un prix plus élevé) que le produit « standard » : le duopole est donc incité à gagner la course.

Proposition 2 *Une politique trop sévère conduit le producteur le plus polluant à cesser son activité de production.*

Le niveau de la taxe environnementale détermine ainsi la structure du marché. L'effet de la taxe sur la nature de la concurrence sur le marché participe à l'incitation du duopole à engager des dépenses de R&D.

Proposition 3 *Une politique de taxation des polluants menée isolément par un État peut être favorable à son partenaire commercial tout en pesant trop lourdement sur la firme en place.*

Dans nos modèles, plus l'écart de profit entre l'innovateur et le perdant de la course (la menace concurrentielle) est important, plus les entreprises investissent en R&D. Tant la structure du marché après l'innovation que le coût de la taxe jouent sur ce différentiel. La proposition 3 est issue du mécanisme suivant : accroître le coût de chaque unité nationale d'émission de polluants tend à favoriser la R&D de l'entreprise domestique et de sa concurrente étrangère. Cependant, un effet

de saturation caractérise la taxe non coopérative : au-delà d'un certain seuil, l'incitation à innover de l'entreprise nationale, supportant cette charge, est d'autant plus faible que cette taxe est élevée. La concurrence à la Bertrand sur un marché homogène renforce cet effet défavorable : l'innovateur étant nécessairement le seul producteur après la course à l'innovation, la menace concurrentielle d'une entreprise est d'autant plus faible que la taxe qu'elle acquitte est elle-même faible et que la taxe imposée à sa concurrente est élevée.

Proposition 4 *Une politique environnementale coopérative est d'autant plus sévère que les consommateurs sont peu sensibles aux caractéristiques environnementales des produits.*

Lorsque la taxe (uniforme) répond à un objectif de maximisation du bien-être total des deux pays (taxe coopérative), le seuil d'efficacité cette taxe conduit à l'éviction de l'entreprise la plus polluante⁽¹⁶⁾ ou, au contraire, permet la survie du duopole.⁽¹⁷⁾ Pour approcher au maximum la date de la découverte de la technologie propre, les planificateurs doivent fixer une taxe plus élevée si le duopole est en concurrence à la Cournot que s'il est en concurrence à la Bertrand sur le marché du bien. Dans ce dernier cas en effet, le duopole perçoit une moindre incitation à innover. La comparaison directe de la taxe la plus incitative pour le duopole de Cournot sur un marché homogène avec celle du duopole de Bertrand sur un marché différencié conduirait à fixer des conditions sur les paramètres technologiques (coût, consommation d'énergie) et structurels (taille du marché, préférence pour le produit vert). La nécessité de la taxation dans un cas et son rôle secondaire dans l'autre laissent cependant penser que la proposition 4 est valable. Cette intuition est confirmée par l'étude des taxes optimales, en particulier en cas de coopération des deux pays.

Proposition 5 *Généralement, la taxe optimale non coopérative est plus faible que la taxe pigouvienne, qui aurait été obtenue en cas de concurrence parfaite, alors que la taxe coopérative est plus élevée.*

Ce résultat doit cependant être nuancé, puisqu'il n'est vérifié que pour certaines configurations des paramètres des modèles. Dans un univers certain, l'imperfection de la concurrence sur le marché du bien et

⁽¹⁶⁾ Pour une économie d'énergie (due à l'innovation) supérieure à 50% sur le marché homogène caractérisé par une concurrence à la Cournot et, pour toute économie d'énergie, en cas de concurrence en prix sur un marché différencié par la qualité.

⁽¹⁷⁾ En cas de concurrence à la Cournot et d'économie d'énergie inférieure à 50% ou de concurrence à la Bertrand sur un marché homogène (bien que l'innovateur reste seul à produire).

la diffusion de la pollution par delà les frontières obligent les planificateurs à mener une politique non coopérative moins sévère que celle de référence (en raison de l'insuffisance de la production et d'un dommage marginal partiellement internalisé). En revanche, pour répartir au mieux la production entre l'entreprise la plus polluante et celle disposant d'une technologie propre, les planificateurs décident d'une taxe coopérative supérieure à la taxe pigouvienne. L'incertitude pesant sur l'issue de la course nous conduit à relativiser ce résultat. Dans ce cadre, les planificateurs maximisent le bien-être espéré de la société. Ils doivent ainsi moduler leur politique en fonction de leur probabilité de victoire dans la course :

- Hormis dans le cas de concurrence à la Bertrand sur un marché homogène, la taxe non coopérative est inférieure au dommage environnemental marginal. Si le duopole se concurrence en prix sur le marché homogène du bien, un tel résultat est obtenu si la pollution transfrontière est limitée et si cette taxe n'excède pas un niveau tel que l'entreprise étrangère réduit son effort de R&D lorsque la taxe nationale augmente.
- Sur un marché homogène, la taxe coopérative est supérieure au dommage marginal dès qu'elle excède la taxe la plus incitative.⁽¹⁸⁾ Lorsque cette dernière condition n'est pas vérifiée, cette plus grande sévérité ne peut être démontrée. Sur un marché différencié, la taxation des émissions est conditionnée par la « conscience écologique » des consommateurs. Au-delà d'une certaine disponibilité à payer du consommateur le plus sensible à la qualité écologique, la taxe n'est pas mise en œuvre. En deçà de ce seuil cependant, la taxe coopérative est plus élevée que la taxe pigouvienne.

Ce dernier résultat met en évidence le rôle fondamental de la sensibilité des consommateurs aux problèmes d'environnement dans la détermination de la politique optimale. Mener une politique coopérative de lutte contre la pollution nécessite une évaluation préalable de la disponibilité à payer des consommateurs. Une importante « conscience écologique » peut en effet se substituer, totalement ou en partie, à la taxe sur les émissions de polluants. En revanche, une totale indifférence des consommateurs aux caractéristiques environnementales des produits induit une politique volontariste d'incitation à la recherche et au développement de technologies propres. Plus qu'une « simple » évaluation de la sensibilité des consommateurs, la relation inverse entre

⁽¹⁸⁾ En conservant l'hypothèse de survie du duopole en cas de concurrence à la Cournot, soit une économie d'énergie inférieure à 50%.

la taxe et cette sensibilité rend nécessaire une politique de diffusion de l'information des États. Ces derniers ont pour rôle de pallier le manque de confiance des consommateurs en ces produits dits, parfois abusivement, « plus respectueux de l'environnement ». Le développement des labels écologiques doit alors s'accompagner de campagnes d'information sur leur attribution. En amont, l'État doit « éduquer » les consommateurs, rarement bien informés des problèmes d'environnement (voir Dobré [1995]).

La taxation optimale des émissions de polluants, dans le cadre des hypothèses utilisées ici, ne remet pas en cause la compétitivité des entreprises subissant cette réglementation. Incitées à investir dans la recherche et le développement de nouvelles techniques de production moins polluantes, elles parviennent à acquérir de nouvelles parts de marché et à améliorer leurs profits (grâce à la réduction de leurs coûts de production et au développement d'une nouvelle demande pour les produits écologiques). L'entreprise la moins polluante, bénéficiant d'un brevet d'invention, tient alors une place dominante sur le marché du bien, au détriment de sa concurrente. Cependant, un accord préalable de coopération entre les pays ou, tout du moins, de mise en place d'une politique de taxation des émissions constitue la condition *sine qua non* d'obtention d'un tel résultat.

BIBLIOGRAPHIE

- D'ASPROMONT, C., R. DOS SANTOS FERREIRA et L.-A. GÉRARD-VARET [1991], Concurrence en prix et équilibres cournotiens, *Revue Economique*, 42 (6), pp. 967–996.
- D'ASPROMONT, C. et A. JACQUEMIN [1988], Cooperative and non-cooperative R&D in duopoly with spillover, *American Economic Review*, 78, pp. 1133–1137.
- BAUMOL, W. et W. OATES [1988], *The Theory of Environmental Policy*, Cambridge, Cambridge University Press.
- BEATH, J., Y. KATSOUALACOS et D. ULPH [1989], Strategic R&D Policy, *The Economic Journal*, Conférence, 99, pp. 74–83.
- BERTRAND, J. [1883], Revue de la « Théorie mathématique de la richesse sociale » et des « Recherches sur les principes mathématiques de la théorie des richesses », *Journal des Savants*, septembre, pp. 499–508.
- BRECARD, D. [1996], L'environnement, nouvelle dimension de la compétitivité économique, Thèse pour le doctorat en sciences économiques, Paris I.

- BREUIL, J.-M. [1992], Modélisation économique des émissions de polluants atmosphériques, Thèse pour le doctorat en sciences économiques, Université de Bourgogne.
- CCE [1992], Document de travail de la Commission relatif à la création d'une taxe sur les émissions de CO₂ et sur l'énergie présenté au Conseil, DG XXI, avril.
- COURNOT, A. [1838], *Recherches sur les principes mathématiques de la théorie des richesses*, Paris. Nouvelle édition, 1980, *Les œuvres complètes de Cournot*, vol. III, Paris.
- DOBRÉ, M. [1995], *L'opinion publique et l'environnement*, Institut français de l'environnement, les dossiers de l'environnement.
- DOS SANTOS FERREIRA R. [1991], Introduction, *Revue Economique*, 42 (6), pp. 959–966.
- ERECO [1994], Evaluation of the diffusion potential of best available technologies (BAT), rapport pour la Commission des Communautés Européenne, DG XII, programme JOULE II, septembre.
- JAFFE, A. B., S. R. PETERSON, P. R. PORTNEY et R. N. STAVINS [1995], Environmental regulation and the competitiveness of U.S. manufacturing : What does the evidence tell us ?, *Journal of Economic Literature*, 33 (1), pp. 132–163.
- LEE, T. et L. WILDE [1980], Market structure and innovation : A reformulation, *Quarterly Journal of Economics*, 94, pp. 429–436.
- LOURY, G. [1979], Market structure and innovation, *Quarterly Journal of Economics*, 93, pp. 345–410.
- MARKUSEN, J. R., E.R. MOREY et H. HETTIGE [1993], Environmental policy when market structure and plant locations are endogenous, *Journal of Environmental Economics and Management*, 24, pp. 69–86.
- MILGROM, P. et J. ROBERTS [1990], Rationalizability learning and equilibrium in games with strategic complementarities, *Econometrica*, 58, pp. 1255–1277.
- MOTTA, M. et J.-F. THISSE, [1993], Minimum quality standard as an environmental policy : Domestic and international effects, Nota di Lavoro, Fondazione Mattei, 20.93.
- OCDE [1995], *Le réchauffement planétaire. Dimensions économiques et stratégies des pouvoirs publics*, Paris.
- OCDE [1996], *Stratégies de mise en œuvre des écotaxes*, Paris.
- PALMER, K., W.E. OATES et P.R. PORTNEY [1995], Tightening environmental standards : the benefit-cost or the no-cost paradigm ?, *Journal of Economic Perspective*, 9 (4), pp. 119–132.
- PORTER, M.E. et C. VANDER LINDE [1995], Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship, *Journal of Economic Perspective*, 9 (4), pp. 97–118.

SELTEN, R. [1975], Reexamination of the perfectness concept for equilibrium points in extensive games, *International Journal of Game Theory*, 4, pp. 25–55.

SINGH, N. et X. VIVES [1984], Price and quantity competition in a differentiated duopoly, *Rand Journal of Economics*, 15 (4), pp. 546–554.

ULPH, D. [1993], Strategic Innovation and Environmental Policy. Nota di Lavoro, Fondazione Mattei, 42.93.