Taxe sur la pollution, permis négociables, et arbitrages de long terme

André Grimaud[1]

Mars 2001

[1]GREMAQ, IDEI et LEERNA, Université de Toulouse I, 21 allée de Brienne, 31000 Toulouse, France.

Table des matières

Résumé

Dans leur ouvrage “Endogenous Growth Theory”, P. Aghion et P. Howitt caractérisent les trajectoires optimales dans un modèle schumpétérien où ils introduisent explicitement des émissions de pollution qui détériorent l’environnement. A partir de cette analyse normative, on construit dans cet article un équilibre. Ceci permet d’analyser les effets des politiques environnementales, taxes ou permis, sur les variables macroéconomiques, et de faire apparaître des arbitrages de long terme, notamment entre amélioration de l’environnement et croissance économique. En outre, on calcule les outils qui permettent d’implémenter l’optimum.

Abstract

In their book “Endogenous Growth Theory”, P. Aghion and P. Howitt characterize the optimal trajectories in a schumpeterian model where they introduce environmental pollution. From this normative analysis, we construct here an equilibrium. This allows us to analyze the effets of environmental policies, taxes or permits, on macroeconomic variables, and to exhibit long term trade-off, particularly between environment improvements and economic growth. Moreover we compute the exact values of economic policy tools which allow the optimum implementation.

1 Introduction

Chacun est convaincu aujourd'hui que des politiques environnementales spécifiques (taxes sur la pollution, permis à polluer, etc ...) doivent être mises en oeuvre si l'on veut réguler les émissions de pollutions, et donc la qualité de l'environnement. Cependant, ces politiques ont des effets, souvent complexes, sur l'ensemble des variables économiques. Le premier objectif de cet article est de mettre en lumière quelques uns de ces effets ; il s'agira notamment d'identifier les canaux par lesquels les politiques environnementales affectent l'équilibre macroéconomique. Le second objectif est de calculer l'ensemble des outils d'intervention qui permettent d'implémenter l'optimum.

Le cadre d'analyse retenu est une version désagrégée du modèle présenté par P. Aghion et P. Howitt dans le chapitre 5 de leur ouvrage, "Endogenous Growth Theory" (1998). Dans ce modèle, P. Aghion et P. Howitt examinent la question de la soutenabilité de la croissance dans un contexte schumpétérien, en présence de pollution et de ressources non renouvelables (des modèles du même type ont été développés par Elbasha et Roe (1996), Hung, Chang et Blackburn (1993) et Verdier (1993)). Ils montrent que, sous certaines conditions, la prise en compte de problèmes environnementaux n'empêche pas l'existence de sentiers de croissance soutenables. Cependant, leur analyse reste strictement normative ; ils observent eux-mêmes que leur étude "has not addressed the initial question of what policies might implement the optimal growth path that have been found".

La version désagrégée que nous avons choisi d'analyser ici est une version "à la Romer (1990)", où les innovations peuvent être qualifiées d'"horizontales" (pour une analyse dans un modèle avec innovations "verticales" "à la Aghion-Howitt", cf. Ricci (1997)). Comme dans le modèle standard, le bien final est produit à partir de travail et de biens intermédiaires dont le nombre est endogène. De plus, les entreprises choisissent à chaque date l'intensité de pollution de la technique qu'elles utilisent : une augmentation de cette intensité provoque, ceteris paribus, une augmentation simultanée de la pollution et de la production. De façon équivalente, on pourra considérer que les entreprises choisissent à chaque date la part de la production qu'elles consacrent à la dépollution : une augmentation de cette part provoque, ceteris paribus, une diminution de la pollution et de la production nette (c'est-à-dire de la production après dépollution).

Puisque l'un de nos objectifs et d'implémenter l'optimum, nous devons éliminer toutes les distorsions qui existent dans l'économie décentralisée. Deux d'entre elles sont standards dans ce type de modèle : d'une part, nous supposerons que l'inventeur de chaque nouveau bien intermédiaire est protégé par un monopole ; d'autre part, il y a un effet externe intertemporel dans la production de connaissance, puisque le nombre de nouveaux biens inventés à chaque instant dépend du stock accumulé jusque là. A ces deux distorsions s'ajoutent maintenant la pollution générée par la production des entreprises. D'où la nécessité de mettre en place un ensemble d'outils d'intervention. Pour les deux premières distorsions, il suffit de subventionner l'achat des biens intermédiaires et la recherche-développement (cf. par exemple Barro-Sala-I-Martin (1995)). Pour ce qui concerne la troisième, nous proposons d'utiliser soit une taxe sur la pollution payée par les entreprises, soit des permis à polluer négociables. Dans ce type de modèle, les deux types d'outils sont équivalents du point de vue de l'efficacité, car ils donnent aux entreprises les mêmes incitations, notamment pour ce qui concerne le choix technologique de l'intensité de pollution (ou, ce qui est équivalent ici, le choix des dépenses de dépollution que les entreprises décident d'engager). Par contre, ces deux outils ont des effets différents du point de vue de la répartition : le montant total de la taxe est payé par les entreprises aux autorités, alors que la valeur totale des permis initialement distribués à chaque entreprise s'ajoute à son profit [1].

L'essentiel des résultats que nous présentons concerne les effets de modifications de ces outils sur l'équilibre macroéconomique. Nous distinguons deux types d'effets : des effets relatifs aux niveaux des variables, et des effets relatifs à leurs taux de croissance. Une modification du niveau de la taxe sur la pollution (ou, ce qui est équivalent, une modification du nombre de permis par unité de produit) a des effets sur les niveaux des variables macroéconomiques. Par exemple, une augmentation de la taxe provoque une baisse simultanée de la pollution et de la consommation par unité de produit : nous dirons ici qu'il y a un arbitrage entre les niveaux de ces variables. La raison essentielle en est que, plus la taxe est élevée, moins la technologie choisie est polluante, mais aussi moins elle et productive. Cependant, une taxe unitaire constante (ou, ce qui est équivalent, un prix constant des permis) ne permet pas de résoudre les problèmes de soutenabilité de la croissance : en effet, même si le niveau de la taxe est élevé, la production et la pollution augmentent à long terme. Il faut donc analyser le cas où la taxe croît (ou, ce qui est équivalent, le cas où la croissance des permis est inférieure à la croissance de la pollution qui résulterait d'une économie où les autorités n'interviendraient pas). Alors, une augmentation du taux de croissance de la taxe (ou, ce qui est équivalent, une baisse du taux de croissance des permis) provoque une baisse simultanée des taux de croissance de la pollution et de la consommation : il y a ici un arbitrage entre les taux de croissance de ces variables. La raison essentielle en est que, à mesure que la taxe (ou le prix des permis) croît, les entreprises choisissent progressivement des techniques de moins en moins polluantes. Ceci permet, si la croissance de la taxe est suffisamment rapide, d'obtenir un état de l'économie où la production

[1] On trouvera des analyses récentes de ces questions dans *Economie et Prévision*, 2-3, n° 143-144 (2000) : cf. notamment l'article de C. Henry et L. Tubiana, et celui de O. Blanchard, P. Criqui, M. Trommetter et L. Viguier. Cf. aussi Jensen et Rasmussen (2000), qui introduisent des permis dans un modèle calibré.

croît alors que la pollution décroît (et donc que la qualité de l'environnement s'améliore) : une telle situation peut être qualifiée d'état de croissance soutenable.

Les canaux de transmission par lesquels les politiques environnementales agissent sur l'économie peuvent être divisés en deux groupes. Certains peuvent être qualifiés d'effets d'équilibre partiel : ils concernent les effets de la taxe sur la pollution (ou du prix des permis) sur le secteur du bien final qui est directement concerné. Pour l'essentiel, les outils d'intervention ont des effets sur les choix technologiques (technologies plus ou moins polluantes) et sur les demandes de biens intermédiaires (celles-ci sont d'autant plus faibles que la taxe est élevée). D'autres effets peuvent être qualifiés d'effets d'équilibre général : puisque les demandes de biens intermédiaires dépendent de la taxe, les profits des monopoles qui produisent ces biens en dépendent aussi. Les politiques environnementales ont donc des effets sur les valeurs actualisées de ces profits, et finalement sur les incitations à la recherche-développement.

Le modèle est présenté dans la section 2. La section 3 est consacrée à l'étude de l'équilibre dans l'économie décentralisée. Dans la section 4, on étudie les effets des politiques environnementales. Enfin, la section 5 est consacrée à l'implémentation de l'optimum.

2 Le modèle

Le modèle considéré ici est un modèle "à la Romer (1990)" dans lequel on introduit des éléments relatifs à l'environnement. L'économie comprend les biens suivants : le bien final (Y) destiné à la consommation (c) et à l'investissement (I) ; le travail (L) utilisé dans la production de Y et dans l'activité de recherche ; B biens intermédiaires ($j = 1, \dots, B$) [2] ; la pollution (P) ; l'environnement (E).

On suppose que, à chaque date t, le bien final est produit par m entreprises identiques. Chaque entreprise i a une fonction de production.

$$Y_i(t) = L_i(t)^{1-\alpha} \left(\sum_{j=1}^{B(t)} X_{ij}(t)^\alpha \right) z_i(t) \qquad 0 < \alpha < 1 \qquad i = 1, \dots, m \tag{1}$$

où $L_i(t)$ et $X_{ij}(t)$ sont respectivement les quantités de travail et de bien intermédiaire j utilisées ; $z_i(t) \in [0, 1]$ est l'intensité de pollution : une augmentation de z_i signifie que l'entreprise utilise des techniques plus polluantes, c'est-à-dire moins coûteuses, ce qui permet d'accroître la production de bien (Y).

[2] Dans la suite du texte, nous supposons que B est grand et nous traitons cette variable comme une variable réelle.

Le flux de pollution $P_i(t)$ émis par l'entreprise i est croissant avec la production $Y_i(t)$ et l'intensité de pollution $z_i(t)$:

$$P_i(t) = Y_i(t) z_i(t)^{\gamma} \qquad \gamma > 0 \qquad i = 1, \dots, m \tag{2}$$

Remarque : La présentation qui vient d'être faite est inspirée de Stokey (1998) et Aghion-Howitt (1998). Une présentation alternative et équivalente (suggérée par S. Smulders) est la suivante. Soit

$$Z_i(t) = L_i(t)^{1-\alpha} \sum_{j=1}^{B(t)} X_{ij}(t)^{\alpha} \quad , \qquad i = 1, \dots, m \tag{3}$$

la production totale ("brute") de l'entreprise i. Supposons qu'elle ait deux usages : la dépollution $D_i(t) = Z_i(t)(1 - z_i(t))$ et la production "nette" $Y_i(t) = Z_i(t) z_i(t)$ consacrée à la consommation et à l'investissement (cf. (1) ci-dessus). Supposons en outre que le flux de pollution de l'entreprise i soit donné par

$$P_i(t) = (Z_i(t) - D_i(t))^{\gamma+1} Z_i(t)^{-\gamma} \qquad \gamma \geq 0 \tag{4}$$

On vérifie sans difficulté que, pour un niveau donné de production brute $Z_i(t)$, $P_i(t)$ est une fonction décroissante et convexe de $D_i(t)$ telle que $P_i(t) = Z_i(t)$ si $D_i(t) = 0$ (c'est-à-dire si $z_i(t) = 1$: pas de dépollution) et $P_i(t) = 0$ si $D_i(t) = Z_i(t)$ (c'est-à-dire si $z_i(t) = 0$: toute la production $Z_i(t)$ est consacrée à la dépollution). En remplaçant $D_i(t)$ par $Z_i(t)(1 - z_i(t))$ dans (4), on obtient $P_i(t) = Z_i(t) z_i(t)^{1+\gamma} = Y_i(t) z_i(t)^{\gamma}$, c'est-à-dire la formule (2) ci-dessus. En résumé, dans la suite du texte, une diminution (resp. une augmentation) de z_i pourra être interprétée comme un choix de technique moins (resp. plus) polluante, ou bien comme une augmentation (resp. une diminution) de la part de la production consacrée à la dépollution.

Notons $P(t) = \sum_{i=1}^{m} P_i(t)$ le flux total de pollution, et $E(t)$ la variable qui mesure la différence entre la qualité actuelle de l'environnement et la qualité maximum que celui-ci aurait en l'absence de pollution. On suppose que l'évolution de l'environnement, $\dot{E}(t)$, dépend de l'environnement $E(t)$ lui-même (il y a une possibilité de régénérescence) et du flux de pollution $P(t)$: $E(t)$ est une variable (négative) dont l'évolution est donnée par

$$\dot{E}(t) = -P(t) - \theta E(t) \tag{5}$$

où $\theta > 0$ peut être interprété comme un taux de régénérescence.

Pour ce qui concerne le secteur des biens intermédiaires, on distingue l'activité de recherche-développement ($R\&D$) qui permet de découvrir de nouveaux biens, et l'activité de production proprement dite.

Le nombre de biens créés à chaque date t est donné par

$$\dot{B}(t) = \delta B(t) n(t) \qquad \delta > 0 \tag{6}$$

où $n(t)$ est le travail consacré à la *R&D*. Par conséquent, $n(t)/\dot{B}(t) = 1/\delta B(t)$ est le coût en travail d'un nouveau bien.

Une fois le bien inventé, la production d'une unité de ce bien entre une date t quelconque et l'infini exige qu'une unité de *capital* soit disponible dès la date t. On a donc

$$X_j(t) = K_j(t) \quad , \qquad j = 1, \ldots, B(t), \tag{7}$$

où $X_j(t) = \sum_{i=1}^{m} X_{ij}(t)$ est la quantité totale de bien j.

Le consommateur représentatif a une durée de vie infinie. Son utilité dépend du niveau de consommation c et de la qualité de l'environnement E : elle prend la forme $\int_0^\infty u(c(t), E(t)) e^{-\rho t} dt$. On suppose que $u(c, E)$ est une fonction séparable et isoélastique [3]. En d'autres termes, on a

$$\frac{\partial u(c,E)}{\partial c} = c^{-\epsilon} \quad \text{et} \quad \frac{\partial u(c,E)}{\partial E} = (-E)^{\omega} \qquad \epsilon > 0, \omega > 0 \tag{8}$$

Finalement, on a

$$L^Y(t) + n(t) = 1 \tag{9}$$

où

$$L^Y(t) = \sum_{i=1}^{m} L_i(t)$$

est la quantité totale de travail utilisée dans la production de bien Y, la quantité totale disponible étant normalisée à 1. On a aussi

$$Y(t) \quad = \quad c(t) + \dot{K}(t) \tag{10}$$

où

$$Y(t) = \sum_{i=1}^{m} Y_i(t) \quad \text{et} \quad K(t) = \sum_{j=1}^{B(t)} K_j(t).$$

(On suppose que l'amortissement du capital est nul).

[3] On retient ici les hypothèses d'Aghion-Howitt. D'autres hypothèses pourraient être envisagées. On pourrait par exemple considérer le cas d'une fonction d'utilité non séparable : sur ce point, cf. notamment Michel et Rotillon (1995) qui étudient de façon détaillée les effets de différentes hypothèses relatives à la fonction d'utilité.

3 L'équilibre

On note p_Y (normalisé à un), $w(t)$ et $p_j(t)(j = 1, \ldots, B(t))$ les prix du bien, du travail, et des biens intermédiaires ; on note $r(t)$ le taux d'intérêt du marché financier (ou, alternativement, le prix de location du capital, puisque l'amortissement est nul).

Nous supposons que les m entreprises qui produisent le bien final Y sont en concurrence parfaite. Pour ce qui concerne l'implémentation de l'optimum dans une économie décentralisée, deux problèmes se posent ici.

D'une part, la "connaissance" (B) est un bien public utilisé dans la production de bien final (cf. (1)) et dans la $R\&D$ (cf. (6)). On fait l'hypothèse, habituelle dans ce type de modèle, que chaque bien intermédiaire est produit par un monopole, ce qui permet de financer la recherche.

D'autre part, les pollutions émises par les entreprises sont des effets externes qui détériorent l'environnement, ce qui nuit au bien-être des consommateurs.

Afin d'implémenter l'optimum, nous utilisons trois outils. D'une part, une subvention à l'achat de chaque bien intermédiaire, afin d'éliminer la distorsion due au pouvoir de marché des monopoles : nous notons τ cette subvention. D'autre part, une subvention à la $R\&D$: nous notons σ le taux de subvention. Enfin, nous supposons que les autorités peuvent observer la pollution P_i émise par chaque entreprise et qu'elles lui imposent une taxe hP_i. Alternativement, nous pouvons supposer que, au lieu d'imposer une taxe, les autorités distribuent des droits (ou permis) à polluer en quantité Q, et qu'elles laissent fonctionner un marché des permis sur lequel le prix sera noté q.

3.1 Comportements des agents

Afin d'alléger les notations, nous omettons la variable "t", représentant le temps.

a) Bien final

Le profit de l'entreprise i s'écrit

$$\pi_i = L_i^{1-\alpha} \left(\sum_{j=1}^{B} X_{ij}^{\alpha} \right) z_i - wL_i - \sum_{j=1}^{B} p_j(1-\tau)X_{ij} - hP_i$$

où

$$P_i = L_i^{1-\alpha} \left(\sum_{j=1}^{B} X_{ij}^{\alpha} \right) z_i^{\gamma+1} \quad \text{(cf. (1) et (2)).}$$

Après substitution, on obtient

$$\pi_i = L_i^{1-\alpha} \left(\sum_{j=1}^{B} X_{ij}^{\alpha} \right) z_i(1 - hz_i^{\gamma}) - wL_i - \sum_{j=1}^{B} p_j(1-\tau)X_{ij} \tag{11}$$

• La maximisation de π_i par rapport à z_i conduit à la condition du premier ordre suivante :

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial z_i} = L_i^{1-\alpha} \left(\sum_{j=1}^{B} X_{ij}^{\alpha} \right) (1 - h(\gamma+1)z_i^{\gamma}) \geq 0$$

$$\begin{aligned} \text{D'où} \quad z_i &= \left(\frac{1}{h(\gamma+1)} \right)^{1/\gamma}, \quad \text{si} \quad h \geq \frac{1}{\gamma+1} \\ z_i &= 1, \qquad\qquad\quad \text{si} \quad h \leq \frac{1}{\gamma+1} \end{aligned} \tag{12}$$

Toutes les entreprises du secteur final choisissent la même intensité de pollution : $z_i = z, \forall i$. Si la taxe augmente (au-delà de $1/(\gamma+1)$), cette intensité de pollution diminue. De façon équivalente (cf. ci-dessus), à production "brute" Z_i donnée, la dépollution $D_i = Z_i(1-z_i)$ augmente et la production nette $Y_i = Z_i z_i$ consacrée à la consommation (c) et à l'investissement $\dot{K}$ diminue : il s'agit du premier canal de transmission par lequel la politique environnementale agit sur le niveau de la production et sur sa croissance.

• La maximisation de π_i par rapport à X_{ij} conduit à

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial X_{ij}} = \alpha L_i^{1-\alpha} X_{ij}^{\alpha-1} z_i(1-hz_i^{\gamma}) - p_j(1-\tau) = 0,$$

$$\text{d'où} \qquad X_{ij} = \left(\frac{\alpha z_i(1-hz_i^{\gamma})}{p_j(1-\tau)} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} L_i.$$

Si $h \geq 1/(\gamma+1)$, on a $z_i = z = (1/h(\gamma+1))^{1/\gamma}$ (cf. (12)), c'est-à-dire $hz^{\gamma} = 1/(\gamma+1)$, et donc $z(1-hz^{\gamma}) = \gamma h^{-1/\gamma}/(\gamma+1)^{(\gamma+1)/\gamma}$.
On en déduit

$$\begin{aligned} X_{ij} &= \left(\frac{\alpha\gamma h^{-1/\gamma}}{p_j(1-\tau)(\gamma+1)^{(\gamma+1)/\gamma}} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} L_i, \quad \text{si} \quad h \geq \frac{1}{\gamma+1} \\ \text{et} \qquad X_{ij} &= \left(\frac{\alpha(1-h)}{p_j(1-\tau)} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} L_i, \quad \text{si} \quad h \leq \frac{1}{\gamma+1} \end{aligned} \tag{13}$$

Naturellement, la demande de chaque bien intermédiaire j est une fonction décroissante de son prix p_j. Cependant, le point-clé ici et qu'elle est aussi une fonction décroissante de la taxe h. Par ce biais, la taxe h agit sur la profitabilité du monopole qui vend ce bien et, finalement, elle a des effets sur l'activité de recherche et sur la croissance économique.

- Enfin, la maximisation de π_i par rapport à L_i conduit à

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial L_i} = (1-\alpha)L_i^{-\alpha}\left(\sum_{j=1}^{B} X_{ij}^{\alpha}\right) z_i(1-hz_i^{\gamma}) - w = 0$$

Compte tenu de la symétrie du problème, nous savons que les biens intermédiaires seront tous vendus aux mêmes prix : $p_j = p, j = 1, \ldots, B$. Donc, à partir de (13), on obtient $X_{ij} = X_i, \forall j$: chaque entreprise i utilise des quantités identiques des différents biens intermédiaires. Ceci implique que les quantités produites des différents biens intermédiaires sont les mêmes : on a en effet $X_j = \sum_i X_{ij} = \sum_i X_i = X, \forall j$.

Utilisons ces résultats pour réécrire la condition du premier ordre obtenue ci-dessus.

D'une part, on sait (cf. (12)) que $z_i = z, \forall i$. D'autre part, on a $L_i^{-\alpha}\sum_j X_{ij}^{\alpha} = L_i^{-\alpha}\sum_j X_i^{\alpha} = B(X_i/L_i)^{\alpha}$. Puisque X_i/L_i est indépendant de i, on a $X_i/L_i = (\sum_i X_i/\sum_i L_i) = X/(1-n)$, où $\sum_i L_i = 1-n = L^Y$ est la quantité totale de travail utilisée pour produire Y (cf. (9)). La condition du premier ordre relative à L_i s'écrit donc :

$$(1-\alpha)B(X/(1-n))^{\alpha}z(1-hz^{\gamma}) = w.$$

En utilisant (12) (qui donne la valeur optimale de z_i), on obtient finalement

$$\begin{aligned} & (1-\alpha)B\left(\frac{X}{1-n}\right)^{\alpha}\frac{\gamma h^{-1/\gamma}}{(\gamma+1)^{(\gamma+1)/\gamma}} = w, \quad \text{si} \quad h \geq \frac{1}{\gamma+1} \\ \text{et} \quad & (1-\alpha)B\left(\frac{X}{1-n}\right)^{\alpha}(1-h) = w, \quad \text{si} \quad h \leq \frac{1}{\gamma+1} \end{aligned} \tag{14}$$

En utilisant (2), $P_i = Y_i z_i^{\gamma}$, et (12), on obtient aussi la pollution par unité de produit de chaque entreprise i :

$$\begin{aligned} \frac{P_i}{Y_i} &= \frac{1}{h(\gamma+1)} \quad , \quad \text{si} \quad h \geq \frac{1}{\gamma+1} \\ \frac{P_i}{Y_i} &= 1 \quad , \quad \text{si} \quad h \leq \frac{1}{\gamma+1} \end{aligned} \tag{15}$$

Lorsque la taxe unitaire h augmente au-delà du seuil $1/(\gamma+1)$, la pollution par unité de produit décroît.

Remarque : taxe sur la pollution et permis à polluer

Jusqu'ici, nous avons supposé que les autorités imposent aux entreprises une taxe unitaire h sur la pollution. Dans ce cadre, si l'on élimine z_i entre les équations

$$Y_i = L_i^{1-\alpha}(\sum_{j=1}^{B} X_{ij}^{\alpha})z_i \quad \text{(cf. (1))}$$

et

$$P_i = Y_i z_i^{\gamma} \quad \text{(cf. (2))},$$

on obtient

$$Y_i = L_i^{(1-\alpha)\gamma/\gamma+1)}(\sum_{j=1}^{B} X_{ij}^{\alpha})^{\gamma/(\gamma+1)} P_i^{1/(\gamma+1)}.$$

Cette fonction est à rendements constants, puisque $(1-\alpha)\gamma/(\gamma+1)+\alpha\gamma/(\gamma+1)+1/(\gamma+1)=1$. Donc, à l'équilibre, le profit de l'entreprise i,

$$\pi_i = Y_i - wL_i - \sum_{j=1}^{B} p_j(1-\tau)X_{ij} - hP_i,$$

est nul.

Supposons maintenant que, à chaque date t, les autorités distribuent une quantité $Q_i(t)$ de permis à polluer à chaque entreprise i. Notons

$$Q(t) = \sum_i Q_i(t)$$

le montant total des permis distribués (observons que les quantités $Q_i(t)$ ne sont pas nécessairement les mêmes), et supposons que ces permis soient échangés sur un marché de concurrence parfaite où le prix unitaire est $q(t)$. Alors, le profit de l'entreprise i est

$$\pi_i(t) \quad = \quad Y_i(t) - w(t)L_i(t) - \sum_{j=1}^{B(t)} p_j(t)(1-\tau)X_{ij}(t) - q(t)(P_i(t) - Q_i(t))$$

où $P_i(t) - Q_i(t)$ est la demande nette de permis de l'entreprise i. En remplaçant P_i par

$$L_i^{1-\alpha}(\sum_j X_{ij}^{\alpha})z_i^{\gamma+1} \quad \text{(cf. (1) et (2))}$$

dans l'expression du profit, la maximisation de celui-ci par rapport aux variables $z_i, X_{ij}(j = 1, \dots, B)$ et L_i, conduit à trois conditions qui sont exactement les conditions (12)-(13)-(14) obtenues ci-dessus, dans lesquelles il suffit de remplacer la taxe unitaire h par le prix des permis q. Il n'y a donc ici aucune différence entre les deux types d'outils, taxe et permis, du point de vue de l'efficacité, c'est-à-dire du point de vue des incitations données aux entreprises. Par contre, les deux méthodes d'intervention conduisent à des résultats différents du point de vue de la répartition : dans le cas d'une taxe, comme nous l'avons vu, toutes les entreprises du secteur final font des profits nuls ; dans le cas de permis, chaque entreprise i réalise un profit qQ_i qui est égal à la valeur de ses avoirs initiaux en permis. On a ici un exemple simple qui illustre les débats opposant les différents intervenants dans les conférences internationales relatives à l'environnement.

b) Biens intermédiaires

La demande totale de bien intermédiaire j est

$$X_j = \sum_{i=1}^{m} X_{ij},$$

où X_{ij} est donné par (13). Puisque $X_j = K_j$ (cf.(7)), le profit du monopole qui vend ce bien est $\pi_j^m = (p_j - r)X_j$. La maximisation de π_j^m conduit à la condition

$$p_j = p = \frac{r}{\alpha} \quad , \quad j = 1, \dots, B \tag{16}$$

En utilisant (13), on obtient les quantités produites

$$\begin{aligned} X_j = X &= \left(\frac{\alpha^2 \gamma h^{-1/\gamma}}{r(1-\tau)(\gamma+1)^{(\gamma+1)/\gamma}} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} (1-n), \quad \text{si} \quad h \geq \frac{1}{\gamma+1} \\ X_j = X &= \left(\frac{\alpha^2(1-h)}{r(1-\tau)} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} (1-n), \quad \text{si} \quad h \leq \frac{1}{\gamma+1} \end{aligned} \tag{17}$$

et le profit

$$\pi_j^m = \pi^m = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) rX \tag{18}$$

pour tout $j = 1, \dots, B$.

Remarque : dans la suite de l'analyse, nous supposerons que la taxe unitaire $h(t)$ croît avec le temps, ou bien, de façon équivalente, que le nombre de permis distribués $Q(t)$ décroît, et donc que leur prix $q(t)$ augmente (comme la taxe). Dès lors, à l'équilibre stationnaire, la quantité produite de chaque bien intermédiaire, $X_j(t) = X(t)$, et le profit réalisé par chaque monopole, $\pi_j^m(t) = \pi^m(t)$, diminuent progressivement dans le temps (cf. (17) et (18)).

c) Recherche

Notons $V_j(t) = V(t) = \int_t^s \pi^m(s)e^{-\int_t^s r(u)du}ds$ la somme des profits anticipés actualisés de chaque monopole. La conditions de libre entrée dans l'activité de recherche s'écrit

$$V(t) \quad = \quad \frac{w(t)(1-\sigma)}{\delta B(t)} \tag{19}$$

d) Consommateur représentatif

La maximisation de l'utilité $\int_0^\infty u(c,E)e^{-\rho t}dt$ conduit à la condition habituelle

$$\frac{\dot{c}(t)}{c(t)} \quad = \quad \frac{r(t)-\rho}{\epsilon} \tag{20}$$

Remarque : pollution et production agrégées

Nous avons vu ci-dessus que toutes les entreprises du secteur final choisissent la même intensité de pollution (cf. (12)) : $z_i = z, \forall i$. Donc la pollution totale

$$P = \sum_i P_i = \sum_i Y_i z_i^\gamma \quad \text{(cf. (2))}$$

dépend de la production totale $Y = \sum_i Y_i$ et de z :

$$P \quad = \quad Y z^\gamma \tag{21}$$

De la même façon, on peut écrire une fonction de production agrégée. Puisque

$$X_{ij} = X_i \quad \forall j, \quad X_j = \textstyle\sum_i X_{ij} = \sum_i X_i = X \quad \forall j, \quad \text{et} \quad z_i = z \quad \forall i,$$

on a (cf. (1))

$$Y_i = L_i^{1-\alpha} B X_i^\alpha z = L_i B \sum_i (X_i/L_i)^\alpha z = L_i B (X/(1-n))^\alpha z.$$

Donc,

$$Y = \sum_i Y_i = (1-n)B(X/(1-n))^\alpha z = BX^\alpha (1-n)^{1-\alpha} z.$$

Puisque $BX = K$, on obtient enfin

$$Y = K^\alpha (B(1-n))^{1-\alpha} z \tag{22}$$

3.2 L'équilibre stationnaire

Supposons que les autorités fixent à des niveaux constants les taux de subventions τ et σ et le taux de croissance g_h de la taxe sur la pollution (de façon générale, on notera g_x le taux de croissance de toute variable x).

Proposition 1 *Il existe un équilibre stationnaire de l'économie où les prix, les quantités et les taux de croissance sont les suivants (on suppose* $h \geq 1/(\gamma+1)$*) :*
Prix :

$$r = H - G\frac{g_h}{\gamma(1-\alpha)} \tag{23}$$

$$\text{où} \quad H = \frac{\alpha\delta + \alpha\rho/\epsilon}{(1-\tau)(1-\sigma)+\alpha/\epsilon} \quad \text{et} \quad G = \frac{\alpha + (1-\tau)(1-\sigma)}{(1-\tau)(1-\sigma)+\alpha/\epsilon}$$

$$p_j = p = \frac{r}{\alpha},\ \forall\, j \tag{24}$$

$$\omega = (1-\alpha)B\left(\frac{X}{(1-n)}\right)^{\alpha}\left(\frac{\gamma h^{-1/\gamma}}{(\gamma+1)^{(\gamma+1)/\gamma}}\right) \tag{25}$$

Quantités :

$$z_i = z = \left(\frac{1}{h/(\gamma+1)}\right)^{1/\gamma},\ \forall\, i \tag{26}$$

$$X_j = X = \left(\frac{\alpha^2\gamma h^{-1/\gamma}}{r(1-\tau)(\gamma+1)^{(\gamma+1)/\gamma}}\right)^{\dfrac{1}{1-\alpha}}(1-n),\ \forall\, j \tag{27}$$

$$X_{ij} = X_i = \left(\frac{X}{1-n}\right)L_i,\ \forall\, i,\ \forall\, j \tag{28}$$

$$n = g_B/\delta = \frac{H-\rho}{\delta\epsilon} + \frac{g_h}{\delta\gamma(1-\alpha)}\left(\frac{(1-\tau)(1-\sigma)(\epsilon-1)}{\epsilon(1-\tau)(1-\sigma)+\alpha}\right) \tag{29}$$

Taux de croissance :

$$
\begin{aligned}
g_r &= g_n = 0 && (30)\\
g_w &= g_Y = g_c = g_K = g_{Y_i} - g_{L_i} = \frac{r-\rho}{\epsilon} = \frac{H-\rho}{\epsilon} - \frac{G}{\epsilon\gamma(1-\alpha)} g_h, \quad \forall\, i && (31)\\
g_X &= g_{X_{ij}} - g_{L_i} = \frac{-g_h}{\gamma(1-\alpha)}, \ \forall i, \ \forall j && (32)\\
g_{z_i} &= g_z = \frac{-g_h}{\gamma} && (33)\\
g_B &= g_Y + \frac{g_h}{\gamma(1-\alpha)} = \frac{H-\rho}{\epsilon} + \frac{g_h}{\gamma(1-\alpha)} \left(\frac{(1-\tau)(1-\sigma)(\epsilon-1)}{\epsilon(1-\tau)(1-\sigma)+\alpha} \right) && (34)\\
g_E &= g_P = g_{P_i} - g_{L_i} = g_Y - g_h = \frac{H-\rho}{\epsilon} - \left(\frac{G}{\epsilon\gamma(1-\alpha)} + 1 \right) g_h, \quad \forall\, i && (35)
\end{aligned}
$$

■

Preuve de la Proposition 1 :

La seule difficulté est l'obtention du taux d'intérêt r. Puisque la taxe croît au taux constant g_h on a, à partir de (17),

$$X(s) = X(t) e^{-g_h(s-t)/\gamma(1-\alpha)} \quad \forall s, t, \quad s \geq t \tag{36}$$

D'où, en utilisant (18),

$$\pi^m(s) = \frac{r(1-\alpha)}{\alpha} X(s) = \frac{r(1-\alpha)}{\alpha} X(t) e^{-g_h(s-t)/\gamma(1-\alpha)} \tag{37}$$

On en déduit la valeur d'une innovation :

$$V(t) = \frac{\pi^m(t)}{g_h/\gamma(1-\alpha)+r} = X(t) \frac{r(1-\alpha)}{\alpha(g_h/\gamma(1-\alpha)+r)} \tag{38}$$

La condition de libre entrée s'écrit (cf. (19)) $V = w(1-\sigma)/\delta B$. En utilisant (14) et en remplaçant X par sa valeur donnée par (13), on obtient

$$\frac{\alpha\delta(1-n)}{(1-\tau)(1-\sigma)} = \frac{g_h}{\gamma(1-\sigma)} + r$$

Puisque $n = g_B/\delta$ (cf. (29)) et $g_B = g_Y = \dfrac{g_h}{\gamma(1-\alpha)} = \dfrac{r-\rho}{\epsilon} + \dfrac{g_h}{\gamma(1-\alpha)}$, cette condition s'écrit

$$\frac{\alpha\delta\left(1 - \dfrac{r-\rho}{\epsilon} - \dfrac{g_h}{\delta\gamma(1-\alpha)}\right)}{(1-\tau)(1-\sigma)} = \frac{g_h}{\gamma(1-\alpha)} + r$$

On en déduit

$$r = \frac{\alpha\delta + \dfrac{\alpha\rho}{\epsilon} - \dfrac{g_h}{\gamma(1-\alpha)}(\alpha + (1-\tau)(1-\sigma))}{(1-\tau)(1-\sigma) + \alpha/\epsilon}$$

c'est-à-dire la formule (23) de la Proposition 1 ■

Revenons à la Proposition 1 et ajoutons quelques observations relatives aux comportements des secteurs du bien final et des biens intermédiaires, et aux effets des politiques environnementales.

- Les entreprises qui produisent le *bien final* vendent $Y(t)$, paient les salaires $w(t)(1-n)$ et achètent les biens intermédiaires $(1-\tau)B(t)X(t)r/\alpha$. Dans le cas d'une taxe sur la pollution, elles paient un impôt $h(t)P(t)$ et leurs profits sont nuls. Dans le cas de permis négociables, chaque entreprise paie $q(t)P_i(t)$, et elle réalise un profit $q(t)Q_i(t)$; le profit total du secteur est donc $q(t)Q(t)$. Toutes ces grandeurs augmentent au même taux g_Y. On a en effet $g_w = g_Y$ (cf. (31)), $g_B + g_X = g_Y$ (cf. (32) et (34)) et $g_h + g_P = g_Y$; cette dernière égalité signifie que la part de l'impôt (ou de la valeur des permis) dans la production totale est constante à l'état stationnaire.
  La figure 1 représente la façon dont se détermine la production par unité de produit $P(t)/Y(t)$ en fonction de la taxe unitaire $h(t)$ou, alternativement, comment se détermine le prix des permis $q(t)$ en fonction de la quantité $Q(t)/Y(t)$ (cf. (15) ci-dessus).

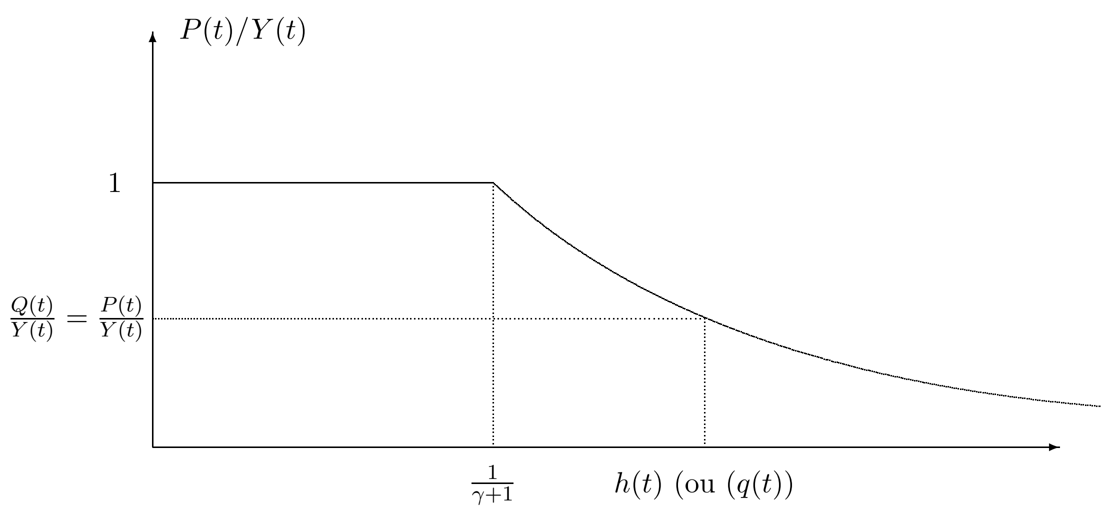

Figure 1 : Détermination de la pollution $P(t)/Y(t)$ en fonction de la taxe $h(t)$ (alternativement, détermination du prix des permis $q(t)$)

- Comme nous l'avons déjà observé, la demande de chaque *bien intermédiaire* ($X(t)$) dépend de la taxe $h(t)$ (ou, alternativement, du prix des permis $q(t)$: cf. (27) et (32)). Il en est de même du profit réalisé par chaque monopole, $\pi^m(t) = (1-\alpha)rX(t)/\alpha$ (cf. (18)), et donc de la valeur de chaque innovation $V(t) = \pi^m(t)/(g_h/\gamma(1-\alpha)+r)$ (cf. (38)).
  Ces trois variables diminuent au même taux :
$$g_X = g_{\pi^m} = g_V = \frac{-g_h}{\gamma(1-\alpha)} \tag{39}$$
  Notons que le coût (en bien Y) d'une innovation est $w(t)(1-\sigma)/\delta B(t)$. Donc, il décroît au taux $g_w - g_B = -g_h/\gamma(1-\alpha)$ (cf. (31) et (34)), qui est le même que le précédent.
  Enfin, la valeur totale des brevets, $B(t)V(t)$, croît au taux $g_B + g_V = g_Y$. Il en est de même de la valeur des innovations $\dot{B}(t)V(t)$.

- Nous allons examiner ci-dessous les effets des politiques environnementales. Contentons-nous ici d'observer que le niveau de la taxe agit sur l'intensité de pollution z (cf.(26)) et sur la quantité produite, X, de chaque bien intermédiaire (cf. (27)). De plus, le taux de croissance de la taxe (g_h) a des effets sur les taux de croissance de nombreuses variables, notamment ceux de X, z, B, E, P et Y. En particulier, si g_h est positif, on a (cf.(34) et (35)) $g_E = g_P < g_Y < g_B$: la pollution croît moins vite que le produit, lequel croît moins vite que la connaissance.

4 Effets des politiques environnementales

Notre objectif est d'étudier les effets de modifications du niveau de la taxe h (et de son taux de croissance g_h) ou, alternativement, de modifications du montant total des permis Q (et du taux de croissance g_Q). Revenons d'abord sur l'équivalence qui existe ici entre les deux outils d'intervention.

Si le niveau de la taxe $h(t)$ est inférieur à $1/(\gamma+1)$, celle-ci n'a aucun effet incitatif ($z(t) = 1$). Dans le cadre de permis, ceci correspond au cas où $Q(t) > Y(t)$, pour tout t : il y a offre excédentaire positive de permis, et leur prix $q(t)$ est nul.

Si $h(t) > 1/(\gamma+1)$, les entreprises choisissent une intensité de pollution $z(t)$ d'autant plus faible que la taxe $h(t)$ est élevée (cf. (26)). Dans le cadre de permis, on est dans le cas où $Q(t) < Y(t)$, pour tout t. Alors le prix des permis est $q(t) = Y(t)/(\gamma+1)Q(t)$: cf. (15) et la figure 1. Dans ce cadre, deux cas peuvent être distingués.

Le premier cas est celui où la taxe est constante : $h(t) = h$, pour tout t, c'est-à-dire $g_h = 0$. Dans le cadre de permis, on a $g_Q = (H-\rho)/\epsilon$, et donc $g_q = 0$: la quantité de permis distribués augmente au même rythme que celui de la production. On a en effet (cf. (31), (34) et (35)) $g_E = g_P = g_B = g_Y$.

Notons que si le taux de croissance des permis est plus élevé, c'est-à-dire si $g_Q > (H-\rho)/\epsilon$, leur prix tend inéluctablement vers zéro.

Le deuxième cas est celui où la taxe croît à taux constant : $g_h > 0$. Dans le cadre de permis, on a $g_Q < (H-\rho)/\epsilon$. Alors, à partir de (35), le taux de croissance du prix des permis est

$$g_q = \frac{(H-\rho)/\epsilon - g_Q}{1 + G/\epsilon\gamma(1-\alpha)} \tag{40}$$

Ici, les taux de croissance de la connaissance, de la production et de la pollution sont modifiés. On a en particulier (cf. (31), (34), (35)) $g_P = g_E < g_Y < g_B$.

4.1 Absence d'intervention publique

Considérons le cas où les autorités n'interviennent pas pour réguler la pollution : on a $h(t) = 0$ (ou bien $Q(t) > Y(t)$, et donc $q(t) = 0$) à chaque date t. On en déduit $z(t) = 1$ (la technique choisie est la plus polluante) et $g_E = g_P = g_Y = g_B = (H-\rho)/\epsilon$. On retrouve le modèle standard "à la Romer" dans lequel la production (Y) croît au même rythme que la connaissance (B). De plus, ici, ce rythme de croissance est aussi celui de la pollution (P) et de la qualité de l'environnement (E). Notons enfin que, comme dans le modèle standard, la quantité de chaque bien intermédiaire (X), le profit de chaque monopole (π^m), et la valeur de chaque innovation (V) sont constants dans le temps (cf. (39)).

4.2 Modification du niveau de la taxe et arbitrage entre niveaux de pollution et de consommation

Supposons la taxe constante : $h(t) = h > 1/(\gamma+1)$. Dans le cadre de permis, on a $Q(t) < Y(t)$, $g_Q = g_Y = (H-\rho)/\epsilon$, et donc $q = Y(t)/(\gamma+1)Q(t)$. Analysons les effets d'une modification de h (ou bien du rapport Q/Y dans le cadre de permis).

Il faut d'abord noter qu'une telle politique environnementale n'a *aucun effet sur les taux de croissance* des différentes variables, notamment la production et la pollution. De (22), $Y = K^\alpha(B(1-n))^{1-\alpha}z$, on obtient $g_Y = \alpha g_K + (1-\alpha)g_B + g_z$, et donc (puisque $g_Y = g_K$) $g_Y = g_B + g_z/(1-\alpha)$. De (21), $P = Yz^\gamma$, on obtient $g_P = g_Y + \gamma g_z$.

D'une part, une variation de h provoque une modification de l'intensité de pollution z, mais elle n'a aucun effet sur son taux de croissance g_z : cf. (26). D'autre part, elle n'a aucun effet sur le travail (n) affecté à la recherche n (cf. (29)) et donc aucun effet sur le taux de croissance de la connaissance $g_B = \delta n$. Ceci vient du fait qu'une telle variation à les mêmes effets sur le coût d'une innovation $w(1-\sigma)/\delta B$ (cf. (25) et (27)) et sur la valeur d'une innovation V (cf. (38) et (27)) : lorsque h augmente, le coût et la valeur d'une innovation diminuent du même montant.

Cependant, une modification du niveau de la taxe a des *effets sur les niveaux* de certaines variables. Afin de les analyser, reprenons les notations introduites dans la remarque de la section 2 : soit Z la production "brute", $D = Z(1-z)$ la dépollution, et $Y = Zz$ la production "nette" consacrée à la consommation c et à l'investissement $\dot{K}$. Les valeurs initiales des variables $Z, D, Y, B, P, E, c, K, z, X$, à l'état stationnaire, sont solutions du système d'équations suivant :

$$\begin{aligned}
&Z_0 = B_0 X_0^{\alpha}(1-n)^{1-\alpha}\ ;\ D_0 = Z_0(1-z_0)\ ;\ Y_0 = Z_0 z_0\ ;\\
&P_0 = Z_0 z_0^{\gamma+1}\ ;\ E_0 = -P_0/(g_E+\theta)(\text{qui vient de } (5),\\
&\dot{E}(t) = -P(t) - \theta E(t),\ \text{vérifié pour tout } t, \text{ notamment } t = 0).\ ;\\
&K_0 = B_0 X_0\ ;\ Y_0 = c_0 + g_K K_0\ ;\ z_0 = (1/h(\gamma+1))^{1/\gamma}\ ;\\
&X_0 = (\alpha^2\gamma/r(1-\tau)(\gamma+1)^{(\gamma+1)/\gamma})^{1/(1-\alpha)}(1-n)h^{-1/\gamma(1-\alpha)}.
\end{aligned}$$

En normalisant par le niveau de production Z_0, on obtient :

$$\begin{aligned}
&\frac{D_0}{Z_0} = 1 - z_0\ ;\ \frac{Y_0}{Z_0} = z_0\ ;\ \frac{B_0}{Z_0} = \frac{1}{X_0^{\alpha}(1-n)^{1-\alpha}}\ ;\\
&\frac{P_0}{Z_0} = z_0^{\gamma+1}\ ;\ \frac{E_0}{Z_0} = \frac{-P_0}{Z_0(g_E+\theta)} = \frac{-z_0^{\gamma+1}}{g_E+\theta}\ ;\\
&\frac{K_0}{Z_0} = \frac{B_0 X_0}{Z_0} = \frac{X_0^{1-\alpha}}{(1-n)^{1-\alpha}} = \frac{\alpha^2\gamma h^{-1/\gamma}}{r(1-\tau)(\gamma+1)^{(\gamma+1)/\gamma}}\ ;\\
&\frac{c_0}{Z_0} = z_0 - g_K\frac{K_0}{Z_0} = Dh^{-1/\gamma}\ (\text{où } D \text{ est une constante positive})\ .
\end{aligned}$$

Considérons deux économies, notées "a" et "b", dont les niveaux de taxes sont différents, et supposons $h^b > h^a$. On a alors $z_0^b < z_0^a$ et $X_0^b < X_0^a$, et on en déduit :

$$\frac{D_0^b}{Z_0^b} > \frac{D_0^a}{Z_0^a}\ ;\quad \frac{Y_0^b}{Z_0^b} < \frac{Y_0^a}{Z_0^a}\ ;\quad \frac{B_0^b}{Z_0^b} > \frac{B_0^a}{Z_0^a}\ ;\quad \frac{P_0^b}{Z_0^b} < \frac{P_0^a}{Z_0^a}\ ;\quad \frac{E_0^b}{Z_0^b} > \frac{E_0^a}{Z_0^a}\ ;$$

$$\frac{K_0^b}{Z_0^b} < \frac{K_0^a}{Z_0^a}\ ;\quad \frac{c_0^b}{Z_0^b} < \frac{c_0^a}{Z_0^a}\ .$$

L'économie où la taxe est la plus élevée est celle qui a la pollution la plus faible et l'environnement de meilleure qualité. Cependant, c'est aussi celle où la consommation est la plus faible. On peut interpréter ces résultats en disant que les autorités font face à un arbitrage entre les niveaux de pollution et d'environnement d'une part, et le niveau de consommation d'autre part. L'origine de cet arbitrage est dans le fait que plus le niveau de la taxe est élevé, plus les techniques choisies par les entreprises sont "propres" (z est "petit"), ce qui améliore la qualité de l'environnement, mais aussi déprime le niveau de la consommation. Une interprétation équivalente peut être faite dans le cas de permis négociables : l'économie où la quantité de permis est la plus faible est celle où leur prix est le plus élevé ; c'est donc celle où l'environnement a la meilleure qualité, mais aussi celle où la consommation est la plus faible.

L'analyse qui vient d'être faite, et qui montre l'existence d'un arbitrage entre niveaux de pollution et de consommation, est à certains égards non satisfaisante. En effet, comme nous l'avons dit, une taxe constante (même de niveau élevé) n'a pas ici d'effet sur les taux de croissance des différentes variables. En particulier, elle n'empêche pas la pollution d'augmenter progressivement, et donc l'environnement de se détériorer. En d'autres termes, les sentiers de croissance analysés ici ne sont pas soutenables [4]. Si l'on souhaite obtenir ce type de sentier, il est nécessaire que la taxe unitaire sur la pollution soit croissante, de telle façon que les entreprises utilisent progressivement de technique de plus en plus "propres".

4.3 Modification du taux de croissance de la taxe et arbitrage entre amélioration de l'environnement et croissance économique

Supposons que la taxe augmente à taux constant : $g_h \geq 0$. Dans le cadre d'une régulation par les permis, on a $g_Q \leq (H-\rho)/\epsilon$ et le taux de croissance du prix des permis, g_q, est donné par (40).

Une modification du niveau de la taxe (à g_h donné), ou bien de la quantité de permis distribués (à g_Q donné) a, comme en 4.2 ci-dessus, des effets sur les niveaux (mais non sur les taux de croissance) des variables P, E, Y, C, K et B. Nous analysons maintenant les effets d'une modification de g_h (ou, dans le cas de permis, d'une modification de g_Q).

4.3.1 Politiques environnementales, croissance et environnement

Les effets d'une modification de g_h sur la croissance du produit (Y) et sur celle de la pollution (P) et de l'environnement (E) sont donnés par (31) et (35) : si g_h augmente, g_Y diminue et, simultanément, $g_P = g_E$ diminue.

[4] Il existe dans la littérature de nombreuses définitions de la soutenabilité. On appelle ici soutenable un sentier le long duquel il y a à la fois croissance du produit (Y) et décroissance de la pollution (P), et donc amélioration de l'environnement (E).

L'effet sur l'évolution de la pollution s'analyse facilement. En effet, de (2), $P(t) = Y(t)z(t)^\gamma$, on obtient $g_P = g_Y + \gamma g_z$. Une augmentation de g_h provoque une baisse de g_Y et une baisse de g_z : une croissance plus faible du produit et des choix plus rapides de technique "propres" conduisent à une croissance plus faible (peut-être même négative) de la pollution.

L'effet sur l'évolution du produit peut être analysé à partir de $g_Y = g_B + g_z/(1-\alpha)$.

D'une part, on sait que $g_z = -g_h/\gamma$ (cf. (33)). Plus g_h est élevé, plus g_z est faible : le rythme d'acquisition de techniques propres s'accélère, ce qui est coûteux en croissance économique.

D'autre part, (34) montre que l'effet d'une augmentation de g_h sur g_B est ambigü. Supposons $0 < \tau < 1$ et $0 < \sigma < 1$ [5].

Si $\epsilon < 1$, une augmentation de g_h (ou, de façon équivalente, une baisse de g_Q) provoque une diminution de n, et donc de $g_B = \delta n$.

Si $\epsilon > 1$, le résultat est opposé : une politique environnementale plus sévère stimule l'innovation (n, et donc $g_B = \delta n$, augmentent). La raison en est la suivante : puisque la valeur de chaque innovation (V) est égale à la somme des valeurs actualisée des profits anticipés par le monopole, elle est, toutes choses égales par ailleurs, une fonction décroissante du taux d'intérêt. Si g_h augmente, $g_Y = g_c$ diminue, et donc $r = \epsilon g_c + \rho$ diminue : cette baisse du taux d'intérêt a un effet positif sur V. Cet effet est d'autant plus important que l'élasticité de l'utilité marginale, ϵ, est élevée. Lorsque ϵ est plus grand que un, cet effet est prépondérant, ce qui explique le résultat apparemment paradoxal que l'on obtient dans ce cas.

4.3.2 Arbitrage entre croissance de la pollution et croissance économique

Nous avons vu ci-dessus qu'une augmentation de g_h (ou une diminution de g_Q) provoque une baisse simultanée de g_P et g_Y. Cependant, (31) et (35) montrent que g_P diminue plus vite que g_Y : il existe donc un arbitrage entre ces deux taux de croissance. Cet arbitrage apparaît clairement si on élimine g_h entre (31) et (35). On obtient dans ce cas

$$g_P = g_Y \left(1 + \frac{\epsilon\gamma(1-\alpha)}{G}\right) - \frac{\gamma(1-\alpha)(H-\rho)}{G} \tag{41}$$

Si $g_h = 0$, on a $g_Y = g_P = (H-\rho)/\epsilon$ (cf. le point E de la figure 2) : la taxe h a des effets sur les niveaux des variables, mais non sur leurs taux de croissance. On retrouve ici le cas étudié en 4.2 ci-dessus. Rappelons que,

[5] Dans le modèle standard "à la Romer", la subvention optimale τ est égale à $1-\alpha$ et σ est effectivement une subvention. Comme l'a montré Benassy (1998), ceci résulte d'une spécification particulière du modèle. De façon générale, la valeur de σ peut être négative : en d'autres termes, σ peut être une taxe.

dans le cadre d'une régulation utilisant des permis, ce cas correspond à $Q(t) \leq Y(t)$ pour tout t et $g_Q = g_Y = (H - \rho)/\epsilon$.

Si $g_h > 0$, on a $g_P < g_Y$ (car g_z est négatif). A mesure que g_h augmente (ou bien que g_Q diminue), g_P et g_Y diminuent : c'est l'arbitrage entre croissance de la pollution et croissance économique.

On obtient $g_E = g_P = 0$ si $g_h = (H - \rho)/(G/\epsilon\gamma(1 - \alpha) + 1)\epsilon$ (cf. (35)). Si g_h est supérieur à cette valeur, on a simultanément $g_E = g_P < 0$ et $g_Y > 0$: ce sont les états stationnaires que nous avons qualifiés de "soutenables" en 4.2 ci-dessus.

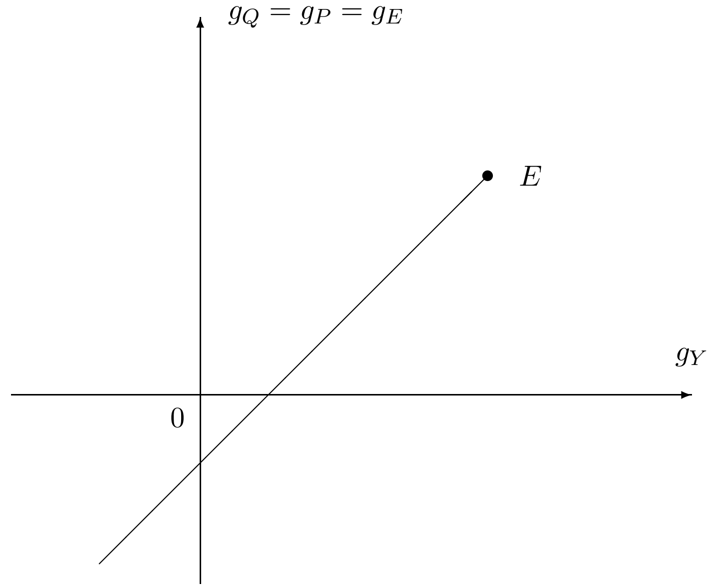

Figure 2 : L'arbitrage entre croissance de la pollution et croissance économique

5 L'optimum et son implémentation

Nous vérifions dans la proposition 2 que le modèle étudié dans les sections précédentes est compatible avec le modèle agrégé que P. Aghion et P. Howitt (1998) étudient dans le chapitre 5 de leur ouvrage. Puis, nous rappelons leurs résultats. Enfin, dans la proposition 3, nous calculons les outils qui permettent d'implémenter l'optimum dans l'économie décentralisée.

Proposition 2 *A l'optimum, la fonction de production agrégée et la fonction de pollution agrégée s'écrivent*

$$Y(t) = K(t)^\alpha (B(t)(1 - n(t)))^{1-\alpha} z(t) \quad et \quad P(t) = Y(t) z(t)^\gamma$$

Preuve de la Proposition 2 :

Etant donnés l'output total Y, la pollution totale P et le travail total $(1-n)$ utilisé pour produire Y, le planificateur social choisit z_i, X_{ij} et L_i qui minimisent le capital $K = \sum_i \sum_j X_{ij}$ utilisé pour produire les biens intermédiaires. Son programme consiste à minimiser $\sum_i \sum_j X_{ij}$ sous les contraintes

$$Y = \sum_i L_i^{1-\alpha} (\sum_j X_{ij}^\alpha) z_i, \;\; P = \sum_i L_i^{1-\alpha} (\sum_j X_{ij}^\alpha) z_i^{\gamma+1}, \;\; \text{et} \; \sum_{i=1}^m L_i = 1-n.$$

On obtient $z_i = z \; \forall i$, $\;\; \sum_i X_{ij} = X_j = X = K/B \; \forall j$, $\;\; X_{ij} = X_i \; \forall j$, et $X_i / L_i = X/(1-n) \; \forall i$. La proposition 2 s'en déduit immédiatement, comme cela a été fait ci-dessus pour obtenir les formules (21) et (22). ■

Nous présentons maintenant le résultat obtenu par P. Aghion et P. Howitt. Aux contraintes que nous avons présentées dans la section 2, ils ajoutent que, à aucun moment, la qualité de l'environnement ne puisse descendre en-dessous d'un seuil minimum, c'est-à-dire $E^{\min} \leq E(t) \leq 0 \; \forall (t)$. Le programme du planificateur consiste à maximiser $\int_0^\infty U(c,E) e^{-\rho t} dt$ sous les contraintes $\dot{K} = K^\alpha (B(1-n))^{1-\alpha} z - c, \dot{B} = \delta B n, \dot{E} = -K^\alpha (B(1-n))^{1-\alpha} z^{\gamma+1} - \theta E, E^{\min} \leq E \leq 0$.

Aghion et Howitt montrent que, étant donné E_0 tel que $E_0 \in [E^{\min}, 0]$, et sous certaines conditions relatives aux paramètres du modèle (en particulier $\epsilon > 1$ et $\delta > \rho$), il existe un sentier de croissance équilibrée correspondant à des valeurs initiales $(c_0, z_0, n_0, K_0, B_0)$ particulières dépendant des paramètres du modèle où les taux de croissance sont :

$$\begin{aligned}
g_Y^o &= g_K^o = g_c^o = (\delta - \rho) \left(\epsilon + \frac{(\epsilon + \omega)/(1+\omega)}{\gamma(1-\alpha)} \right)^{-1} > 0, \;\; \text{car } \delta > \rho \\
g_P^o &= g_E^o = \frac{1-\epsilon}{1+\omega} g_K^o < 0, \;\; \text{car } \epsilon > 1 \\
g_z^o &= \frac{-(\epsilon+\omega)}{\gamma(1+\omega)} g_K^o < 0 \\
g_B^o &= \left(1 + \frac{(\epsilon + \omega)/(1+\omega)}{\gamma(1-\alpha)} \right) g_K^o > 0
\end{aligned}$$

et où l'on a en outre

$$\begin{aligned}
n^o &= g_B^o / \delta \\
X^o = \frac{K^o}{B^o} &= \left(\frac{\alpha \gamma z^o}{(\rho + \epsilon g_c^o)(\gamma+1)} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} (1-n^o)
\end{aligned}$$

Dans ces expressions, le symbole g_x^o représente de façon générale le taux de croissance d'une variable x quelconque à l'optimum.

Il est maintenant possible d'implémenter l'optimum. On suppose que les autorités connaissent le rythme optimal auquel les techniques propres doivent être introduites dans l'économie ; en d'autres termes, elles connaissent le taux $g_z^o = \frac{-(\epsilon+\omega)}{\gamma(1+\omega)} g_K^o$ et, naturellement, elles interviennent afin que les entreprises le respectent. Par ailleurs, rappelons que, à chaque date t, le capital détenu par les entreprises du secteur des biens intermédiaires est égal au nombre total d'unités de ces biens qu'elles produisent ; c'est-à-dire $K(t) = B(t)X(t)$, ce qui implique $g_K = g_B + g_X$.

Proposition 3 *Si les autorités interviennent de telle façon que* $g_h = -\gamma g_z^o$, $\tau = 1 - \alpha$, *et* $\sigma = 1 - \dfrac{\delta - \frac{g_h}{\gamma(1-\alpha)} - g_Y^o}{\epsilon g_Y^o + \rho + \frac{g_h}{\gamma(1-\alpha)}}$, *l'équilibre stationnaire est optimal.*

Preuve de la Proposition 3 :

Supposons $g_h = -\gamma g_z^o$. On a alors :

- $g_z = g_z^o$, puisque $g_z = -g_h/\gamma$, d'après (33) ;
- $g_X = g_X^o$, puisque $g_X = \dfrac{-g_h}{\gamma(1-\alpha)} = \dfrac{1}{1-\alpha} g_z$ d'après (32) et (33), et que $g_X^o = g_K^o - g_B^o = \dfrac{1}{1-\alpha} g_z^o$.

Supposons $\tau = 1-\alpha$ et $\sigma = 1 - \dfrac{\delta - \frac{g_h}{\gamma(1-\alpha)} - g_Y^o}{\epsilon g_Y^o + \rho + \frac{g_h}{\gamma(1-\alpha)}}$, et donc $(1-\tau)(1-\sigma) = \dfrac{\alpha(\delta - \frac{g_h}{\gamma(1-\alpha)} - g_Y^o)}{\epsilon g_Y^o + \rho + \frac{g_h}{\gamma(1-\alpha)}}$. Alors, on a nécessairement $g_Y^o = g_Y$.

En effet,

$$
\begin{aligned}
g_Y^o = g_Y \quad & \Leftrightarrow \quad g_Y^o = \frac{r-\rho}{\epsilon} \\
& \Leftrightarrow \quad r = \epsilon g_Y^o + \rho \\
& \Leftrightarrow \quad \frac{\alpha\delta + \frac{\alpha\rho}{\epsilon} - \frac{g_h}{\gamma(1-\alpha)}(\alpha + (1-\tau)(1-\sigma))}{(1-\tau)(1-\sigma) + \alpha/\epsilon} = \epsilon g_Y^o + \rho \\
& \Leftrightarrow \quad \alpha\delta + \frac{\alpha\rho}{\epsilon} - \frac{g_h}{\gamma(1-\alpha)}(\alpha + (1-\tau)(1-\sigma)) \\
& \qquad = (1-\tau)(1-\sigma)(\epsilon g_Y^o + \rho) + \frac{\alpha}{\epsilon}(\epsilon g_Y^o + \rho) \\
& \Leftrightarrow \quad (1-\tau)(1-\sigma) = \frac{\alpha\left(\delta - \frac{g_h}{\gamma(1-\alpha)} - g_Y^o\right)}{\epsilon g_Y^o + \rho + \frac{g_h}{\gamma(1-\alpha)}}
\end{aligned}
$$

On en déduit immédiatement

- $g_c = g_c^o$, puisque $g_c = g_Y$ et $g_c^o = g_Y^o$.
- $g_B = g_B^o$, puisque $g_B = g_c - g_X$ (d'après (32) et (34)), $g_B^o = g_K^o - g_X^o = g_c^o - g_X^o$, et $g_X = g_X^o$.
- $n = n^o$, puisque $n = g_B/\delta$ et $n^o = g_B^o/\delta$.
- $g_P = g_P^o$, puisque $g_P = g_Y + \gamma g_z$ et $g_P^o = g_Y^o + \gamma g_Y^o$ (car $P = Yz^\gamma$).

D'où $g_E = g_E^o$, puisque $g_E^o = g_P^o$ et $g_E = g_P$.

Enfin, puisque $\tau = 1 - \alpha$, on a $X = X^o$. En effet,

$$X = \left(\frac{\alpha\gamma z}{p(1-\tau)(\gamma+1)}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}}(1-n) = \left(\frac{\alpha\gamma z}{r(\gamma+1)}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}}(1-n),$$

d'après (24), (26) et (27),

$$\text{et} \quad X^o = \frac{K^o}{B^o} = \left(\frac{\alpha\gamma z^o}{(\rho+\epsilon g_c^o)(\gamma+1)}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}} = X.$$

■

6 Conclusion

Dans cet article, nous avions un double objectif : calculer les outils de politique économique qui permettent d'implémenter l'optimum dans un modèle de croissance endogène avec innovations et pollution, et analyser les effets des politiques environnementales sur l'ensemble des variables macroéconomiques. Le premier objectif est essentiellement technique. Le second a conduit à une analyse qui a fait apparaître deux types d'effets, et donc deux types d'arbitrages : certains concernent les niveaux des variables, d'autres concernent leurs taux de croissance.

Les canaux de transmission par lesquels les politiques environnementales agissent sur les variables économiques sont nombreux. Cependant, l'un d'entre eux mérite une attention particulière, notamment parce qu'il pourrait faire l'objet d'études ultérieures : il concerne les effets de ces politiques sur les innovations qui, dans ce type de modèle, sont la source même de la croissance. On peut en particulier se demander si un modèle de croissance avec innovations pourrait constituer un cadre d'analyse pertinent pour justifier la conjecture de Porter et van der Linden (1995) selon laquelle des politiques environnementales plus sévères peuvent, dans certains cas, stimuler la croissance [6].

[6] Cf. par exemple Rubio et Aznar (1999) pour un tour d'horizon de la littérature récente sur ce point. Cf. aussi Xepapadeas et de Zeeuw (1999) qui présentent une vision originale de cette question.

References

Aghion, P. and P. Howitt (1992) "A Model of Growth Through Creative Destruction", *Econometrica*, **60**, 323–351.

Aghion, P. and P. Howitt (1998) "Endogenous Growth Theory", The MIT Press.

Beltratti, A. (1995) "Growth with Natural and Environmental Resources", FEEM working paper 58–95, Milan.

Benassy, J.P. (1998) "Is there always too little research in endogenous growth with expanding product variety", *European Economic Review*, **42**, 61–69.

Blanchard, O., Criqui, P., Trommetter, M. and L. Viguier (2000), "Au-delà de Kyoto : enjeux d'équité et d'efficacité dans la négociation sur le changement climatique", *Economie et Prévision*, 2-3, **n^o 143-144**, 15–36.

Bovenberg, A.L. and S. Smulders (1995) "Environmental Quality and Pollution Augmenting Technological Change in a Two-Sector Endogenous Growth Model", *Journal of Public Economics*, **57**, 369–391.

Bovenberg, A.L. and S. Smulders (1996) "Transitional Impacts of Environmental Policy in an Endogenous Growth Model", *International Economic Review*, à paraître.

Brock (1979) "A Polluted Golden Age" in V.L. Smith ed. Economics of Natural and Environmental Resource, NY Cambridge University Press.

Brundtland (1987) *Our Common Future*, World Commission on Environment and Development, UK, Oxford University press.

Dasgupta, P.S. and G.M. Heal (1979) *Economic Theory and Exhaustible Resources*, UK, Oxford University Press.

Elbasha, E.H. and T.L. Roe (1996) "On Endogenous Growth : The Implications of Environmental Externalities", *Journal of Environmental Economics and Management*, **n^{o}31**, 240–268.

Grimaud, A. (1998), "Pollution Permits and Sustainable Growth in a Schumpeterian Model", *Journal of Environmental Economics and Management*, **38**, 249–266.

Grossman, G.M. and E. Helpman (1991) "Innovation and Growth in the Global Economy", Cambridge MA, MIT Press.

Henry, C. and L. Tubiana (2000), "Instruments économiques dans la perspective du changement climatique", *Economie et Prévision*, 2-3, **n^o 143-144**, 1–14.

Hotelling, H. (1931) "The Economics of Exhaustible Resources", *Journal of Political Economy*, **39**, 137–175.

Hung, V., P. Chang and K. Blackburn (1993) “Endogenous Growth, Environmental and R & D”, FEEM working paper 23–93, Milan.

Jensen, J. and T.N. Rasmussen (2000), “Allocation of CO_2 Emision Permits : A General Equilibrium Analysis of Policy Instruments”, *Journal of Environmental Economics and Management*, **40**, 111–136.

Michel, P. (1993) “Pollution and Growth Towards the Ecological Paradise”, FEEM 80–93, Milan.

Michel, P. and G. Rotillon (1995) “Disutility of Pollution and Endogenous Growth”, *Environmental and Resource Economics*, **Vol. 6**, 279–300.

Musu, I. (1994) “On Sustainable Endogenous Growth”, FEEM Working paper 11–94, Milan.

Porter, M.E. and C. van der Linden (1995), “Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship”, *Journal of Economic Perspective*, **9**,n^{0}4, 119–132.

Ricci, F. (1997) “Implementing the Optimal Policy in a Model of Growth through Vertical Innovations with Pollution44, mimeo, IDEI, University of Toulouse I.

Romer, P. (1990) “Endogenous Technological Change”, *Journal of Political Economy*, **98**, 71–102.

Rubio, S.J. and J. Aznar (1999), “Sustainable growth and environmental policies”, Department of Economic Analysis, University of Valencia.

Schubert, K. and P. Zagamé (1998), “L’environnement : une nouvelle dimension économique”, Vuibert, Paris.

Smulders, S. (1995) “Entropy, Environment, and Endogenous Economic Growth”, *International Tax and Public Finance*, **2**, 319–340.

Stokey, N. (1998) “Are there Limits to Growth”, *International Economic Review*, Vol. **39**, n^{0}1.

Verdier, T. (1993) “Environmental Pollution and Endogenous Growth : a Comparison between Emission taxes and Technological Standards”, FEEM working paper 57–93, Milan.

Xepapadeas, A. (1994) “Long-Run Growth, Environmental Pollution and Increasing Returns”, FEEM working paper 67–94, Milan.

Xepapadeas, A. and A. de Zeeuw (1999) “Environmental Policy and Competitiveness : The Porter Hypothesis and the Composition of Capital”, *Journal of Environmental Economics and Management* **37**, 165–182.