

# PERMIS D'EMISSION NEGOCIABLES, RESSOURCES NON-RENOUVELABLES ET CROISSANCE

André Grimaud<sup>1</sup>  
et Luc Rouge<sup>2</sup>

Résumé - Nous développons un modèle de croissance endogène dans lequel l'utilisation d'une ressource non-renouvelable dans le processus de production génère un flux de pollution. Ce flux affecte la dynamique du stock d'environnement, qui est un argument de la fonction d'utilité, supposée ici non-séparable. Nous étudions les effets d'équilibre général d'une politique environnementale consistant en l'annonce au marché d'un profil de permis d'émission négociables. Nous montrons en particulier qu'une politique plus restrictive favorise la croissance ; en outre, elle peut, à travers le canal de la dynamique du prix des permis, stimuler l'effort de R&D (dans le cas où les ménages valorisent suffisamment l'environnement).

Abstract – *Tradeable Permits, Non-Renewable Resources and Growth*. We set up an endogenous growth model in which the use of a non-renewable resource within the production process generates a flow of pollution. This flow affects the dynamics of the stock of environment, which is an argument of the non-separable utility function. We study the general equilibrium effects of an environmental policy consisting in emissions of tradeable permits. In particular, we show that a more stringent policy promotes growth; moreover, it can lead, by the channel of the permits price dynamics, to more *R & D* (when households give a strong value to their environment).

Classification *JEL* : O32, O41, Q20, Q32

## INTRODUCTION

La possibilité, ainsi que l'optimalité, d'une croissance de long-terme en présence de stocks finis de ressources sont des questions largement étudiées dans la littérature. Les deux principaux types de modèles utilisés pour traiter ces questions, c'est-à-dire les modèles à la Ramsey (on peut citer Stiglitz (1974), ou Dasgupta et Heal (1979)), et les modèles de

---

<sup>1</sup> GREMAQ, IDEI and LEERNA, Université de Toulouse, 21, allée de Brienne, 31000 Toulouse, France, et Groupe ESC Toulouse. E-mail : [grimaud@cict.fr](mailto:grimaud@cict.fr)

<sup>2</sup> Groupe de Recherche en Finance, Groupe ESC Toulouse. E-mail : [l.rouge@esc-toulouse.fr](mailto:l.rouge@esc-toulouse.fr)

croissance endogène (Schou (1996), Aghion et Howitt (1998), ou Grimaud et Rouge (2003)), ont généralement montré qu'une croissance de long-terme était possible, souhaitable, et qu'elle était obtenue à l'équilibre sous certaines conditions technologiques (et dans la mesure où, dans le second type de modèles, les politiques d'incitation à la recherche sont mises en place).

En fait, le caractère non-renouvelable de certaines des ressources qui sont utilisées dans les économies n'est plus réellement considéré comme un problème majeur, et les craintes du Club de Rome semblent être, au moins partiellement, injustifiées. En revanche, c'est la qualité de l'environnement, et sa détérioration par les différents types de pollutions émises par l'activité humaine qui sont peu à peu devenues des préoccupations importantes dans l'opinion ainsi que dans les communautés scientifiques.

Certains pays ont pris conscience des dangers que représentait l'augmentation des émissions polluantes à l'échelle mondiale. Aussi, des sommets mondiaux ont-ils vu le jour, où les nations ont tenté de se coordonner sur des politiques globales de réduction de ces émissions. Une Convention-cadre des Nations-Unies portant sur la réduction des émissions dans l'atmosphère de CO<sub>2</sub> (le principal gaz à effet de serre) et d'autres gaz à effet de serre a été adoptée par 160 pays au Sommet de la Terre de Rio (en mai 1992). La Conférence de Kyoto (décembre 1997) a notamment abouti à la mise au point d'un protocole de réduction des dégagements de ces gaz sur plusieurs décennies, et la Conférence de Johannesburg (août 2002) sur le Développement Durable a réaffirmé le caractère impératif de telles mesures.

En effet, si la présence de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère est à 96% d'origine "naturelle" et provient pour seulement 4% de l'activité humaine, cette dernière proportion ne cesse d'augmenter. Les émissions de CO<sub>2</sub> ont été multipliées par 17 entre 1890 et les années 1990. Ces émissions sont causées à 70-75% par la combustion des énergies fossiles (charbon, hydrocarbures) ; or, la plupart des modèles étudiant les problèmes "croissance-environnement", et notamment

ceux qui se penchent sur la pollution liée aux dégagements de gaz à effet de serre, négligent le fait que ce sont des ressources non-renouvelables qui sont à l'origine de cette pollution. Parallèlement, l'ensemble de la littérature traitant de la croissance en présence de ressources non-renouvelables présentée jusqu'ici ne prend pas en compte la pollution générée par l'utilisation de celles-ci. Au vu des faits brièvement rappelés plus haut, il semble bien qu'une synthèse des deux approches (croissance-ressources non renouvelables et croissance-environnement) soit nécessaire.

Certains auteurs se sont déjà penchés sur le fait qu'une partie des émissions polluantes observées provient de l'utilisation de ressources non-renouvelables. Kolstad et Krautkraemer (1993) font une revue de cette littérature, et soulignent la complexité (notamment technique) des problèmes étudiés. Plus récemment, Hoel et Kverndokk (1996), puis Tahvonen (1997), ont étudié des trajectoires optimales d'utilisation d'une ressource polluante lorsqu'il existe une technologie alternative non-polluante -les différences se situant dans la structure des coûts. Schou (2000 et 2002) étudie des modèles de croissance à la Lucas et à la Romer, lorsque l'utilisation d'une ressource non-renouvelable crée une externalité négative affectant soit la technologie (érosion, rouille, santé des travailleurs), soit le bien-être des ménages. Dans les deux cas, il conclut qu'à l'équilibre, une politique environnementale spécifique n'est pas nécessaire afin de mettre en oeuvre l'optimum. Le point essentiel dans cette problématique générale vient de ce que désormais, utiliser la ressource (et donc l'extraire) signifie polluer. La ressource est donc un input sale, à la différence du capital physique, du travail ou encore de la connaissance. Ainsi, la question n'est plus uniquement "à quel rythme utiliser un stock de ressource fini ?", ou "comment répartir un stock fini de ressource sur une infinité de générations", mais également "à quel rythme émettre un stock fini de pollution ?", ou encore, « comment répartir un stock fini de pollution sur une infinité de générations ». En prenant en compte les caractéristiques polluantes des ressources, nous ajoutons une nouvelle dimension au problème : le choix d'un sentier d'extraction implique à présent le choix d'un sentier

d'émission.

Dans cet article, nous considérons que l'utilisation d'une ressource naturelle non-renouvelable dans le processus de production génère un flux de pollution. La qualité de l'environnement est un stock dont l'évolution au fil du temps dépend négativement de ce flux de pollution et positivement de sa propre capacité d'auto-régénération. Par ailleurs, en plus de la consommation instantanée, ce flux est un argument de la fonction d'utilité. En fait, nous utilisons une fonction d'utilité non-séparable (comme, par exemple Gradus et Smulders (1993)) et nous allons voir que ce choix implique d'importantes modifications dans la condition de Ramsey-Keynes. En effet, le taux de croissance de la consommation dépend du taux d'intérêt, mais aussi du taux de croissance de la qualité environnementale (ou, de façon équivalente, du taux d'extraction de la ressource). Nous développons un modèle de croissance endogène dans lequel la croissance est générée par un processus d'innovations horizontales. Contrairement à ce qui est fait dans la littérature standard, la connaissance n'est pas incorporée dans des biens intermédiaires. C'est pourquoi nous supposons qu'elle est directement payée par ceux qui l'utilisent. Afin de corriger les distorsions créées par la pollution due à l'utilisation de la ressource, nous mettons en place une politique environnementale consistant en une émissions de permis d'émission négociables. Ceci nous permet de rester cohérents avec les observations précitées (protocole de Kyoto). Une politique économique consiste donc en l'annonce au marché d'un profil de permis émis par le gouvernement ; ceci détermine automatiquement le profil d'émissions polluantes, et donc l'extraction de la ressource. Notons d'ores et déjà que, étant donnée la modification de la condition de Ramsey-Keynes mentionnée plus haut, cette politique aura des effets directs sur le comportement d'épargne des ménages et, par là même, sur le taux de croissance de la consommation. En outre, elle aura un impact profond et complexe sur l'économie à l'équilibre général, car elle génère un profil de prix des permis qui affecte les variables de l'équilibre (effort de R&D, croissance économique...) précisément à travers le canal des prix. Nous

montrons en particulier que l'instrument de politique économique n'est pas le prix des permis (sa modification entraîne uniquement un transfert de revenus entre secteurs) mais plutôt leur dynamique. De plus, nous prouvons que, dans le cadre de notre modèle, une politique environnementale plus restrictive génère un effort accru de R&D, si le goût de la société pour la qualité de son environnement est assez élevé ; par ailleurs, au lieu de freiner l'économie, cette mesure promeut sa croissance, ce qui peut être interprété comme une possible justification de l'hypothèse de Porter et Van der Linde (1995).

Dans la section 2 de cet article, nous présentons le modèle et nous caractérisons complètement l'équilibre dans la section 3. Nous étudions alors dans la section suivante les effets de la politique environnementale en présentant les modifications de l'équilibre subséquentes à la mise en place d'une telle politique. Enfin, nous faisons quelques remarques de conclusion.

## 1. LE MODELE

A chaque date  $t$ , une quantité  $Y_t$  de bien de consommation est produite selon la technologie :

$$Y_t = A_t^\nu L_{Y_t}^\alpha R_t^{1-\alpha}, \text{ avec } 0 < \alpha < 1 \text{ et } \nu > 0, \quad (1)$$

où  $L_{Y_t}$  est le flux de travail,  $A_t$  le stock total de connaissance, et  $R_t$  le flux de ressource non-renouvelable utilisée dans la production.

Notons qu'il n'y a pas ici de biens intermédiaires incorporant la connaissance comme dans les modèles standards de croissance endogène (voir, par exemple, Jones (2003) qui utilise plusieurs modèles de ce type). Le secteur produisant le bien de consommation utilise directement la connaissance. Celle-ci est composée d'innovations : une innovation est un bien public indivisible (pensons par exemple à la formule d'une nouvelle molécule, à un logiciel informatique, à une base de données, etc...).

Les innovations sont produites par le secteur de la R&D selon la technologie

$$\dot{A}_t = \delta L_{RDt} A_t, \delta > 0, \quad (2)$$

où  $L_{RDt}$  est le flux de travail alloué à la R&D.

On suppose que le flux total de travail est fixe, et on le normalise à un. Donc, à chaque date  $t$ , on a :

$$L_{Yt} + L_{RDt} = 1. \quad (3)$$

La ressource est extraite sans coût à partir d'un stock initial fini  $S_0$  ; nous avons la relation standard :

$$\dot{S}_t = -R_t. \quad (4)$$

Enfin, la fonction d'utilité du ménage représentatif est

$$u(C_t, E_t) = \int_0^{+\infty} \frac{[C_t (-E_t)^{-\omega}]^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon} e^{-\rho t} dt, \text{ avec } \varepsilon > 0 \text{ et } \omega > 0. \quad (5)$$

où  $\rho$  est le taux de préférence pour le présent, supposé positif. Par ailleurs,

$$C_t = Y_t, \quad (6)$$

c'est-à-dire que la totalité du flux de production est consommé par le ménage ; et  $E_t$  est, comme dans Aghion-Howitt (1998 (p 157)), une variable négative mesurant la différence entre la qualité observée de l'environnement et sa limite supérieure (atteinte dans le cas d'une cessation définitive de toute émission polluante). Nous supposons que la loi d'évolution de  $E_t$  est

$$\dot{E}_t = -P_t - \phi E_t, \text{ avec } \phi > 0 \quad (7)$$

où

$$P_t = \gamma R_t, \text{ avec } \gamma > 0, \quad (8)$$

$P_t$  étant le flux de pollution généré par l'utilisation de la ressource naturelle dans le processus de production. Donc  $E$  se dégrade progressivement sous l'effet de la pollution, mais bénéficie d'une auto-régénération.

On suppose parfaitement concurrentiels les marchés du bien de consommation, du travail, de la ressource, et le marché financier. On normalise le prix du bien de consommation à un, et on note respectivement  $w_t$ ,  $p_{Rt}$  et  $r_t$ , le salaire, le prix de la ressource et le taux d'intérêt. On suppose que les innovateurs protègent leurs découvertes par un droit de propriété intellectuelle dont la durée est infinie. Chaque innovateur accorde des licences d'exploitation à tous les utilisateurs potentiels, c'est-à-dire les secteurs utilisant la connaissance : ici, le secteur du bien de consommation, et celui de la R&D. Nous notons  $v_{Yt}$  et  $v_{RDt}$  les prix de location d'une innovation respectivement payés par les deux secteurs. Le gain total associé à la location d'une innovation à la date  $t$  est donc  $v_t = v_{Yt} + v_{RDt}$ . Dès lors, la valeur d'une innovation à la date  $t$  est  $V_t = \int_t^{+\infty} v_s e^{-\int_t^s r_u du} ds$ . En différenciant cette équation par rapport au temps, on obtient

$$r_t = v_t / V_t + \dot{V}_t / V_t. \quad (9)$$

La concurrence étant parfaite sur les marchés des biens privés, et les technologies étant à rendements constants sur les inputs privés (voir (1) et (2)), les profits des entreprises sont nuls une fois que ces inputs privés sont payés. Dès lors, nous faisons l'hypothèse que le gouvernement subventionne intégralement l'achat de connaissance.

Afin de réguler les émissions polluantes, on suppose que, à chaque date  $t$ , les autorités allouent une quantité  $Q_t$  de permis négociables aux entreprises produisant le bien de consommation. Ces permis sont échangés sur un marché concurrentiel où leur prix est  $q_t$ . Une politique environnementale consiste donc en l'annonce d'un profil de permis  $\{Q_t\}_{t=0}^{+\infty}$ . De façon équivalente, on pourrait supposer que les autorités imposent une taxe unitaire  $\tau_t$  sur la pollution (ou, ce qui est équivalent ici, sur le flux de ressource extraite) ; dans ce cas, la politique environnementale serait l'annonce d'un profil de taxe  $\{\tau_t\}_{t=0}^{+\infty}$ .

## 2. EQUILIBRE

### 2.1 Comportement des agents

#### 2.1.1 Secteur du bien de consommation

A chaque date  $t$ , les avoirs alloués en permis négociables ont une valeur  $q_t Q_t$ . Les achats de permis sont égaux à  $q_t P_t = q_t \gamma R_t$  (voir (8)), et l'achat de ressource à  $p_{Rt} R_t$ . Le profit instantané dans ce secteur est donc

$$\pi_t^Y = A_t^Y L_{Yt}^\alpha R_t^{1-\alpha} - w_t L_{Yt} - p_{Rt} R_t (1 + \gamma q_t / p_{Rt}) + q_t Q_t. \quad (10)$$

Notons  $\theta_t = 1 + \gamma q_t / p_{Rt}$ . Observons que, si les autorités prélevaient une taxe  $\tau_t$  sur le flux de ressource extraite, le profit s'écrirait  $\pi_t^Y = A_t^Y L_{Yt}^\alpha R_t^{1-\alpha} - w_t L_{Yt} - p_{Rt} R_t \theta_t$ , où  $\theta_t = 1 + \tau_t$  (naturellement, ici, il n'y a plus d'avoirs initiaux en permis). Dans la suite du texte, la variable

$p_{R_t} \theta_t$  représentera le coût global d'une unité de ressource (dans le cas présent d'une politique d'émission de permis,  $p_{R_t}$  est payé au propriétaire de la ressource, et  $\gamma q_t$  est payé aux propriétaires des permis) ; dès lors, nous interprèterons  $\theta_t$  soit comme le prix des permis, soit comme la taxe unitaire.

En différenciant  $\pi_t^Y$  par rapport à  $L_{Y_t}$  et  $R_t$ , et en égalisant à zéro, on obtient les deux conditions du premier ordre :

$$w_t = \alpha A_t^\nu L_{Y_t}^{\alpha-1} R_t^{1-\alpha} \quad (11)$$

$$p_{R_t} \theta_t = (1-\alpha) A_t^\nu L_{Y_t}^\alpha R_t^{-\alpha}. \quad (12)$$

De plus, la profitabilité marginale d'une innovation est

$$v_{Y_t} = \partial \pi_t^Y / \partial A_t = \nu A_t^{\nu-1} L_{Y_t}^\alpha R_t^{1-\alpha}. \quad (13)$$

*Remarque* : nous pourrions considérer un secteur désagrégé en  $n$  entreprises dont les fonctions de production seraient  $Y_{jt} = A_t^\nu L_{Y_{jt}}^\alpha R_{jt}^{1-\alpha}$ ,  $j = 1, \dots, n$ . Dans ce cas, on noterait  $Q_{jt}$  la quantité de permis alloués à l'entreprise  $j$ , avec  $\sum_{j=1}^n Q_{jt} = Q_t$  pour tout  $t$ . Nos résultats seraient inchangés.

### 2.1.2 Secteur de la ressource naturelle

On suppose le marché de la ressource concurrentiel. La maximisation du profit

$\int_t^{+\infty} p_{R_s} R_s e^{-\int_t^s r_u du} ds$ , sous les contraintes  $\dot{S}_s = -R_s$ ,  $S_s \geq 0$ ,  $R_s \geq 0$ ,  $s \geq t$ , conduit à la règle

d'Hotelling standard :

$$\frac{\dot{P}_{Rt}}{P_{Rt}} = r_t, \text{ for all } t. \quad (14)$$

### 2.1.3 Secteur de la R&D

On suppose que, à chaque date  $t$ , le flux d'innovations  $\dot{A}_t = \delta L_{RDt} A_t$  est vendu au prix  $V_t$ . Le profit du secteur est donc  $\pi_t^{RD} = \delta L_{RDt} A_t V_t - w_t L_{RDt}$ . La condition de libre entrée s'écrit

$$w_t = \delta A_t V_t \quad (15)$$

De plus, la profitabilité marginale d'une innovation dans ce secteur est

$$v_{RDt} = \partial \pi_t^{RD} / \partial A_t = \delta L_{RDt} V_t. \quad (16)$$

*Remarques.*

- 1) Ici encore, on pourrait désagréger le secteur en un grand nombre de firmes ; les résultats ne seraient pas modifiés.
- 2) Nous supposons ici que le gouvernement possède toute l'information et peut ainsi parfaitement déterminer  $v^Y$  et  $v^{RD}$ . Il s'agit évidemment d'un premier pas, et des hypothèses différentes (assymétries d'information, incomplète extraction des surplus...) pourraient être introduites.

### 2.1.4 Ménage représentatif

La maximisation de la fonction d'utilité  $u(C_t, P_t) = \int_0^{+\infty} \frac{[C_t(-E_t)^{-\omega}]^{1-\varepsilon}}{1-\varepsilon} e^{-\rho t} dt$  sous la contrainte de

budget intertemporelle du ménage conduit à la condition suivante :

$$\frac{\dot{C}_t}{C_t} = \frac{r_t - \rho - \omega(1-\varepsilon)\dot{E}_t/E_t}{\varepsilon}, \text{ à toute date } t. \quad (17)$$

## 2.2. Caractérisation de l'équilibre

Nous caractérisons à présent les sentiers d'équilibre de cette économie. Nous concentrons notre étude sur les états stationnaires, c'est-à-dire ceux pour lesquels toutes les variables croissent à taux constants. Ici, une politique environnementale consiste donc en l'annonce d'un vecteur  $\{Q_0, g_Q\}$  (dans la suite du texte, nous noterons  $g_x$  le taux de croissance de toute variable  $x$ ). Notons par ailleurs que, puisqu'à chaque instant le montant total de pollution  $P_t$  est donné par le montant de permis émis  $Q_t$ , on a  $g_Q = g_P$ . De plus, à l'état-stationnaire, les équations (7) et (8) conduisent à  $g_P = g_R = g_E$ .

**Proposition 1** *L'équilibre à l'état-stationnaire est caractérisé par les taux de croissance et quantités suivants :*

$$g_\theta = \frac{-\rho + \delta v(1-\varepsilon) - g_Q(\varepsilon(1-\omega) + \omega)}{(1-\alpha + \varepsilon\alpha)}, \quad (18)$$

$$L_{RD} = 1 - L_Y = \frac{-\alpha\rho + \delta v((\alpha + \omega)(1-\varepsilon) + \varepsilon) + g_\theta\alpha(1-\varepsilon)(\alpha + \omega - 1)}{\delta v(\varepsilon(1-\omega) + \omega)}, \quad (19)$$

$$g_A = \delta L_{RD}, \quad (20)$$

$$g_C = g_Y = \frac{-\rho + \delta v(1 + \omega - \varepsilon\omega) - g_\theta(1 - \alpha - \alpha\omega(1 - \varepsilon))}{\varepsilon(1 - \omega) + \omega}. \quad (21)$$

On peut vérifier qu'un équilibre intérieur existe ( $g_R < 0$  et  $0 < L_{RD} < 1$ ) si et seulement si  $\rho < (\delta v/\alpha)((\alpha + \omega)(1 - \varepsilon) + \varepsilon)$ . Dans le cas  $\omega > 1 - \alpha$ , la condition  $\varepsilon < (\alpha + \omega)/(\alpha + \omega - 1)$

doit aussi être remplie. Ceci permet notamment d'éviter les solutions de coin telles qu'un effort de recherche nul, par exemple.

L'équation (18) montre comment le sentier d'émission des permis décidé par les autorités ( $g_Q$ ), détermine le taux de croissance du prix de ces permis ( $g_\theta$ ). Une fois  $g_Q$ , et donc  $g_\theta$ , déterminés, l'équation (19) explique comment le travail est réparti entre recherche et production. Enfin, (20) donne le taux de croissance de la connaissance, et (21) le taux de croissance de la production, et donc de la consommation.

### Démonstration (indicative) :

A l'état-stationnaire, en utilisant (1), (6), (2) et (16), on obtient  $(\varepsilon(1-\alpha-\omega)+\omega)g_R = r - \rho - \varepsilon\nu\lambda\sigma L_{RD}$ .

De même, à partir de (12) et (13), il vient :  $r = -\alpha g_R + \nu\delta L_{RD} - g_\theta$ .

Enfin, en utilisant (14), (11) et (1), on obtient  $\dot{V}/V = (1-\alpha)g_R + (\nu-1)g_A$ . A partir de ce résultat et en utilisant successivement (9), (13), (15) et (2), on obtient  $(1-\alpha)g_R = (\delta\nu/\alpha)(1-\alpha)L_{RD} - (\delta\nu/\alpha) + r$ .

Ces trois équations permettent de calculer les trois variables  $g_R$ ,  $r$  and  $L_{RD}$  en fonction de  $g_\theta$ . On en déduit les relations (18), (19), (20) et (21) de la proposition 1.

*Remarque.* Supposons que la politique environnementale consiste en l'annonce au marché d'un profil de taxe, c'est-à-dire, à l'état-stationnaire, d'un vecteur  $\{\theta_0, g_\theta\}$ . En inversant la relation fonctionnelle (18), on obtient le taux de croissance des émissions polluantes  $g_P$ , en fonction de  $g_\theta$ . On en déduit immédiatement  $g_E = g_R = g_P$ . Finalement, de (19), (20) et (21), on déduit également  $L_{RD}$ ,  $g_A$  et  $g_Y$  en fonction du taux de croissance de la taxe  $g_\theta$ .

### 3. POLITIQUE ENVIRONNEMENTALE

Une politique environnementale, qui consiste ici, comme on l'a vu, en l'annonce d'un profil d'émissions de permis, génère un profil de prix  $g_\theta$ , comme le montre l'équation (18). Rappelons que  $p_{Rt}\theta_t$  peut être vu comme le coût global d'une unité de ressource, c'est-à-dire, comme le prix unitaire incorporant la valeur des permis. On a  $dg_\theta/dg_Q < 0$  : ceci signifie que si les autorités annoncent un profil de permis imposant une extraction plus lente de la ressource (c'est-à-dire moins de ressource extraite aujourd'hui et plus demain), alors le prix des permis diminue :  $g_\theta$  est négatif. Dans le cas inverse (extraction plus rapide imposée par les autorités), le prix des permis augmente. Nous nous concentrerons dans notre analyse sur le premier cas, celui qui correspond à une politique environnementale plus contraignante dès aujourd'hui (comme ce qui est imposé par exemple dans le protocole de Kyoto).

Les effets d'une telle politique sur les autres variables sont résumés dans la proposition suivante.

**Proposition 2 :** *Un accroissement de  $g_Q$ , c'est-à-dire, une diminution de  $g_\theta$ , conduit à un accroissement de  $g_Y$ . Simultanément, cela génère une baisse de  $L_{RD}$ , et donc de  $g_A$ , si et seulement si  $\omega < 1 - \alpha$ .*

**Démonstration :** Les résultats se déduisent immédiatement de la proposition 1.

A l'état-stationnaire, un accroissement de  $g_Q$  (c'est-à-dire la mise en place d'une politique

environnementale, ou encore son renforcement), impose un accroissement de  $g_R$ , ce qui correspond à une diminution de l'extraction de la ressource, et donc des émissions polluantes, pour les générations présentes. Dès lors, ceci implique une diminution de la production courante, toutes choses égales par ailleurs (ainsi qu'un accroissement de  $g_Y$ , puisque, à partir de (1), on a  $g_Y = \nu g_A + (1 - \alpha)g_R$  : cette stimulation de la croissance illustre dans le présent exemple la conjecture de Porter et Van der Linde (1995)). En définitive, l'effet le plus direct de la politique environnementale pour les premières générations est d'améliorer l'environnement, tout en diminuant leur consommation.

La réaction des ménages à ce nouveau contexte dépend de leurs préférences. Considérons le cas-limite où  $\omega = 0$ . Ici, les ménages sont indifférents à leur environnement, ils réagissent donc comme dans le cas standard sans pollution (voir Stiglitz (1974), ou Schou (1996)). La seule façon de compenser partiellement la diminution de la consommation courante, consiste à accroître le montant de l'autre input de la fonction de production : le travail alloué à la production. Pour cette raison, le travail alloué à la recherche décroît, et la croissance de la connaissance est freinée. Plus généralement, ceci se produit lorsque  $\omega < 1 - \alpha$  (voir proposition 2).

Si  $\omega$  est élevé, les ménages valorisent fortement leur environnement. Dès lors, la diminution initiale de la consommation conduit à une désutilité qui peut être compensée par le gain en utilité dû à un environnement plus propre. Nous pouvons même envisager le cas où, les ménages retirant une très forte utilité de l'amélioration de leur environnement,  $L_Y$  diminue, ce qui cause un accroissement de  $L_{RD}$ . Une politique environnementale contraignante peut donc promouvoir l'effort de recherche si les ménages valorisent fortement leur environnement. Ceci correspond au cas  $\omega > 1 - \alpha$  de la proposition 2.

Nous avons étudié ci-dessus une politique environnementale par les quantités qui déterminent le

taux de croissance des prix des permis et toutes les autres variables de l'économie. Notons qu'il subsiste une indétermination sur le prix initial de ces permis, c'est-à-dire sur le partage de la rente entre propriétaire de la ressource et détenteur des permis. Si la politique environnementale consistait en l'annonce d'un profil de taxe, comme il a été évoqué plus haut, celui-ci déterminerait  $g_Q$  (voir (18)), et les effets de cette politique seraient les mêmes (équations (19), (20) et (21) de la proposition 1 inchangées). Dans ce cas, ce sont les modifications du taux de croissance de la taxe ( $g_\theta$ ) qui ont des effets sur l'ensemble des variables de l'économie. En revanche, une modification du niveau de la taxe n'a que des effets redistributifs entre le gouvernement et le propriétaire de la ressource (sur ce point, voir Grimaud et Rouge (2005)).

## CONCLUSION

L'objectif principal de cet article était d'étudier les effets d'une politique environnementale dans un cadre d'analyse d'équilibre avec les caractéristiques suivantes :

- l'utilisation d'une ressource naturelle non-renouvelable dans le processus de production génère un flux de pollution qui affecte négativement l'évolution du stock d'environnement,
- les ménages sont caractérisés par une fonction d'utilité non-séparable dont les arguments sont la consommation et le stock d'environnement,
- les autorités utilisent des permis d'émission négociables afin de contrôler les émissions,
- le secteur de la R&D produit des innovations horizontales, et la connaissance n'est pas incorporée dans des biens intermédiaires.

Nous décrivons complètement l'équilibre, et nous analysons comment les variables fondamentales sont affectées par la politique environnementale. Nous montrons que c'est le

taux de croissance du prix des permis qui est le canal de transmission clef de cette politique ; par contre, le niveau de ce prix n'a que des effets redistributifs. Enfin, nous montrons que la mise en place d'une telle politique (ou son accentuation) conduit à un effort accru (respectivement moindre) en matière de recherche lorsque les ménages attribuent beaucoup (respectivement peu) de valeur à leur environnement. Dans tous les cas, cela favorise la croissance.

Une intéressante voie de recherche future consisterait à envisager la possibilité de substituer à la ressource non-renouvelable polluante une ressource renouvelable non-polluante (telle que l'énergie solaire...).

## BIBLIOGRAPHIE

Aghion, P. et P. Howitt (1998), *Endogenous Growth Theory*, The MIT Press.

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

Gradus, R. et S. Smulders [1993], “The Trade-off between Environmental Care and Long-term Growth; pollution in three proto-type growth models”, *Journal of Economics*, 58 , No. 1, p. 25-51.

Grimaud, A. et L. Rouge (2003), “Non-Renewable Resources and Growth with Vertical Innovations: Optimum, Equilibrium and Economic Policies”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 45, p. 433-453.

Grimaud, A. et L. Rouge (2005), “Polluting Non-Renewable Resources, Innovation and Growth: Welfare and Environmental Policy”, à paraître dans *Resource and Energy Economics*.

Hoel, M. et S. Kverndokk (1996), “Depletion of Fossil Fuels and the Impacts of Global Warming”, *Resource and Energy Economics*, 18, p. 115-136.

Jones, C.I. (2003), “Growth and Ideas”, Working Paper, Department of Economics, U.C. Berkeley and NBER.

Kolstad, C.D. et J.A. Krautkraemer (1993), “Natural Resource Use and the Environment”, dans : *Handbook of Natural Resources and Energy Economics*, vol. III, A.V. Kneese and J.L. Sweeney (eds.), Elsevier Science Publishers, p. 1219-1265.

Porter, M.E. et C. van der Linde (1995), “Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship”, *Journal of Economic Perspectives*, 9(4), p. 97-118.

Schou, P. (1996), “A Growth Model with Technological Progress and Non-renewable Resources”, Mimeo, University of Copenhagen.

Schou, P. (2000), “Polluting Non-Renewable Resources and Growth”, *Environmental and Resource Economics*, 16, p. 211-227.

Schou, P. (2002), “When Environmental Policy is Superfluous: Growth and Polluting Resources”, *Scandinavian Journal of Economics*, 104, p. 605-620.

Stiglitz, J. (1974), “Growth with Exhaustible Natural Resources : I) Efficient and Optimal Growth, II) The Competitive Economy”, *Review of Economic Studies Symposium*, 41, p. 123–152.

Tahvonen, O. (1997), “Fossil Fuels, Stock Externalities, and Backstop Technology”, *Canadian Journal of Economics*, XXX, p. 855-874.