Quels instruments pour une politique environnementale ?

Gilles Saint-Paul
D4E, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable
et
Université de Toulouse I.

February 17, 2003

1 Introduction

L'objet de cette note est de préciser la nature des instruments optimaux visant à réduire la pollution. Plus précisément, on se demande si des subventions à la recherche-développement dans des domaines " verts " (économies d'énergie, dépollution, énergies renouvelables, captation du carbone) peuvent suppléer à une taxation directe de la pollution, ou si cette dernière est suffisante.

A technologie donnée, et en supposant qu'on puisse négliger les effets distortionnaires du financement des dépenses publiques, l'instrument idéal de la politique environnementale devrait être la taxation "pigovienne " des émissions polluantes. Par " taxation pigovienne " on entend que la collectivité impose aux pollueurs une taxe égale à l'équivalent monétaire du coût marginal qu'ils imposent à la société sous forme de pollution. Chaque problème particulier de pollution peut donc se résoudre au moyen d'un instrument unique, à condition bien entendu qu'il soit effectivement possible de calculer le coût social de l'externalité considérée.

Qu'en est-il lorsque la technologie n'est pas donnée, par exemple s'il existe un secteur de recherche et développement susceptible d'inventer de nouveaux biens et de nouveaux procédés, dont certains peuvent réduire les émissions et d'autres pas ? A priori, une réallocation de l'activité de recherche et développement au profit des inventions " propres " devrait contribuer à la réduction des émissions polluantes. On peut envisager d'utiliser, en plus de la taxation de la pollution, une subvention à la recherche et développement dans le secteur " propre ".

L'analyse économique justifie-t-elle l'utilisation d'un tel instrument supplémentaire ? Ce n'est pas totalement évident a priori. En effet, la taxation de la pollution crée d'elle même des incitations à réallouer l'effort de recherche et développement vers les secteurs propres. Elle induit une augmentation du coût pour l'utilisateur des biens et procédés intensifs en pollution, ce qui réduit les profits des entreprises qui possèdent les brevets correspondant à ces biens et à ces procédés. Ce sont ces profits qui déterminent les incitations à innover, de sorte que les incitations à innover en technologies " malpropres " sont automatiquement réduites.

On pourrait donc penser que l'allocation de l'effort de recherche entre secteur propre et secteur sale se fait optimalement, et que la taxation pigovienne des émissions reste suffisante même si la technologie est endogène. Cela serait effectivement le cas si les innovateurs pouvaient s'approprier toute la valeur sociale de leur invention (par exemple au moyen de prix de Lindahl (Voir Grimaud, 2002) ou si, en tant que monopoles, ils pouvaient parfaitement discriminer par les prix). Dans ce cas, la seule inefficacité qui subsiste est l'externalité de pollution, et elle peut se régler à nouveau grâce au seul instrument de taxation.

On sait cependant qu'il s'agit là d'un cas extrême, et que l'appropriabilité du surplus social par l'innovateur n'est jamais totale. Cela entraîne-t-il qu'une subvention à la R et D verte soit souhaitable en plus d'une taxation sur la pollution? Le modèle développé ci-dessous permet de répondre à la question, dans le contexte d'un modèle à deux périodes d'innovation endogène où les biens polluants coexistent avec les biens non polluants.

2 Le modèle

La population totale est normalisée à 1. Il y a deux périodes, et un seul facteur de production, le travail, dont l'offre totale est inélastique et égale à un à chaque période.

En première période, on peut soit faire de la recherche, soit produire un bien homogène, dénoté par m. La fonction de production du bien homogène est donnée par

$$y = l.$$

L'activité de recherche et développement consiste à inventer les biens différenciés qui seront consommés en seconde période. Ces biens sont de deux type: polluants (P) et non polluants (NP). Pour inventer un bien, il faut θ unités de travail. θ est une variable choisie par l'entreprise, avec $\theta \geq \theta_0$, et plus elle est élevée (plus l'entreprise fait d'efforts), plus il y a de chances que le bien inventé soit non polluant. La probabilité pour que le bien inventé soit non polluant est $f(\theta)$, avec $f(\theta_0) = 0, f' > 0, f(+\infty) = 1$. En conséquence, si cette économie consacre l_R unités de travail à la recherche, avec un input de θ unités de travail par bien, elle inventera $N = l_R/\theta$ biens et parmi ceux-ci il y a une masse $N_N = f(\theta)N$ de biens non polluants et $N_P = (1 - f(\theta))N$ de biens polluants (Pour appliquer la loi des grands nombres et éviter des problèmes d'indivisibilité on considèrera les biens comme formant un continuum).

En deuxième période la consommation se répartit entre tous les biens inventés en première période. Chacun d'entre eux, repéré par un indice i, est produit suivant une fonction de production linéaire:

$$y_i = l_i$$

On suppose que les biens sont ordonnés de telle sorte que le bien i est polluant si $0 \leq i \leq N_P$ et non polluant si $N_P < i \leq N$. Les consommateurs dont identiques en termes d'utilité, et ils peuvent différer ou non en termes de dotation en travail. La fonction d'utilité est

$$u = m + \beta \left[\int_0^N c_i^\alpha di \right]^{1/\alpha} - \beta \left[\pi \int_0^{N_P} \bar{c}_i di \right]^\gamma .$$

Le premier terme représente l'utilité dérivée de la consommation de m unités du bien générique en première période. Le second terme représente l'utilité de la consommation des N biens différenciés en seconde période, suivant Dixit et Stiglitz (1977); on a $0 < \alpha \leq 1$. Le troisième terme, où $\bar{c}_i$ est la consommation totale de bien i, représente la désutilité engendrée par les activités polluantes. Il est considéré comme une pure externalité dans le choix du consommateur. On suppose une désutilité convexe croissante de la pollution, soit $\gamma \geq 1$. On notera que dès lors que $\gamma > 1$, l'externalité environnementale vérifie les conditions d'Inada, c'est-à-dire que la désutilité des premières unités de pollution est nulle.

3 L'équilibre

On normalise les salaires en première et en deuxième période à 1. Soit R le revenu du consommateur en deuxième période (si w_1 est son revenu net d'impôts en première période, w_2 son revenu net d'impôts en seconde période, et r le taux d'intérêt du marché entre les deux périodes, alors $R = (1 + r)(w_1 - m) + w_2)$). La contrainte budgétaire du consommateur en seconde période est donc

$$\int_0^N p_i c_i = R,$$

où p_i dénote le prix du bien i.

La demande de bien i est donc donnée par

$$c_i = \frac{R p_i^{-1/(1-\alpha)}}{\int_0^N p_i^{-\alpha/(1-\alpha)} di}.$$

Chaque bien i est produit par un monopole qui détient le brevet sur ce bien. Les biens polluants sont taxés à taux τ, de sorte que le prix pour le producteur est $p'_i = p_i/(1 + \tau)$. La formule précédente implique que l'élasticité-prix de la demande pour tout bien est égale à $-1/(1 - \alpha) = -\sigma$. Ceci implique que le prix est égal au produit du coût marginal (égal à $w = 1$), multiplié par une marge égale à $\mu = \sigma/(\sigma - 1) = 1/\alpha$. On en déduite que le prix d'un bien non polluant est égal à $p_P = \mu$, tandis que le prix d'un bien polluant est égal à $p_{NP} = \mu(1 + \tau)$. Il en résulte que la consommation d'un bien non polluant est égale à

$$c_{NP} = \frac{R}{\mu\psi},$$

et celle d'un bien polluant égale à

$$c_P = \frac{R}{\mu\psi}(1 + \tau)^{-1/(1-\alpha)}.$$

Avec

$$\psi = N_P(1 + \tau)^{-\alpha/(1-\alpha)} + N - N_P. \tag{1}$$

La partie de la fonction d'utilité provenant de la consommation en seconde période peut ensuite être calculée:

$$\begin{aligned} u_2 &= \beta \left[\int_0^N c_i^\alpha di \right]^{1/\alpha} \\ &= \beta \frac{R}{\mu} \psi^{1/\alpha - 1}. \end{aligned}$$

On notera que les fonctions de demande sont linéaires en R, de sorte qu'on peut les agréger entre consommateurs. Le profit d'une entreprise produisant un bien non polluant est donné par

$$\begin{aligned} \pi_N &= (\mu - 1)\bar{c}_N \\ &= \frac{(\mu - 1)\bar{R}}{\mu\psi}, \end{aligned} \tag{2}$$

où $\bar{c}_N$ est la consommation agrégée d'un bien non polluant et $\bar{R}$ le revenu agrégé de seconde période. De même, le profit d'une entreprise produisant un bien polluant est donné par

$$\begin{aligned} \pi_P &= (\mu - 1)\bar{c}_P \qquad (3) \\ &= \frac{(\mu - 1)\bar{R}}{\mu\psi}(1 + \tau)^{-1/(1-\alpha)}, \end{aligned}$$

où c_P est la consommation agrégée d'un bien polluant.

Nous pouvons maintenan résoudre le problème d'optimisation intertemporelle du consommateur:

$$\max m + \beta \frac{R}{\mu} \psi^{1/\alpha - 1},$$

sous la contrainte

$$m + \frac{R}{1+r} = w_1 + \frac{w_2}{1+r}.$$

La solution de ce programme, étant donnée la linéarité de u en m et R détermine le taux d'intérêt réel à l'équilibre:

$$\frac{1}{1+r} = \frac{\beta}{\mu} \psi^{1/\alpha - 1} \tag{4}$$

On notera que ce taux d'intérêt réel, exprimé en termes de travail puisque le salaire est normalisé à un dans les deux périodes, est plus élevé quand le taux de préférence pour le présent est plus élevé (β plus faible), quand la taxe sur la pollution est plus élevée, et quand le markup est plus élevé; ces deux derniers exercices correspondent à une réduction de la valeur hédonique d'une unité de travail demain relativement à aujourd'hui.

C'est uniquement à travers son effet sur le taux d'intérêt réel que la concurrence monopolistique crée une distorsion dans ce modèle. En effet, tous les biens de seconde période étant en situation de concurrence monopolistique, avec le même markup, ce dernier n'affecte pas l'allocation de la consommation entre les biens disponibles en seconde période. En revanche, il réduit le prix de la consommation en première période relativement à la seconde période, ce qui tend à créer un déficit d'épargne en première période; pour compenser ce déséquilibre, le taux d'intérêt doit augmenter. Cette distorsion réduit à son tour l'incitation à innover en première période. Les effets de la concurrence monopolistique en seconde période seraient plus complexes s'il existait des biens non soumis à celle-ci en seconde période, ou si l'offre de travail était élastique. Le markup augmenterait alors la consommation relative de biens concurrentiels et/ou réduirait l'offre de travail.

Nous nous penchons maintenant sur le comportement des entreprises dans le secteur de la recherche/développement. L'invention d'un bien se traduit par l'obtention d'un brevet garantissant le monopole sur le bien inventé au cours de la seconde période. De plus, on suppose que le gouvernement subventionne la recherche en versant une prime égale à s_N pour chaque bien non polluant inventé et égale à s_P pour chaque bien polluant inventé (en principe, ces primes peuvent être négatives).

La fonction objectif d'une entreprise de recherche est donc donnée par

$$\max_{\theta} V = \frac{1}{1+r}\left[f(\theta)(\pi_N + s_N) + (1 - f(\theta))(\pi_P + s_P)\right] - \theta.$$

Le premier terme est l'espérance mathématique actualisée du profit de monopole. Le second est le coût du travail nécessaire à l'invention. La condition du premier ordre détermine θ, la quantité de travail investie dans le but que l'invention soit propre:

$$\frac{f'(\theta)}{1+r}(\pi_N + s_N - \pi_P - s_P) = 1 \tag{5}$$

Elle nous dit que le coût marginal d'une unité d'effort supplémentaire pour rendre la technologie plus propre est égal au rendement marginal de cet investissement, i.e. le produit de l'incrément dans la probabilité que l'innovation soit non polluante, et de la différence actualisée entre le profit net de subventions d'une invention non polluante et le profit net de subvention d'une invention polluante.

En outre, il y a libre entrée dans le secteur de la R & D, de sorte qu'à l'équilibre les profits sont nuls:

$$\frac{1}{1+r}\left[f(\theta)(\pi_N + s_N) + (1 - f(\theta))(\pi_P + s_P)\right] = \theta. \tag{6}$$

Le modèle est clos de la manière suivante: l'équilibre du marché du travail en première période implique que

$$1 - \theta N = \bar{m}, \tag{7}$$

où $\bar{m}$ est la consommation agrégée de bien homogène.

L'équilibre du marché du travail en seconde période implique que

$$N_P\bar{c}_P + (N - N_P)\bar{c}_N = 1,$$

ce qui permet de déterminer $\bar{R}$:

$$\bar{R} = \frac{\mu\psi}{N_P(1+\tau)^{-1/(1-\alpha)} + (N - N_P)}. \tag{8}$$

D'où:

$$\bar{c}_{NP} = \frac{1}{N_P(1+\tau)^{-1/(1-\alpha)} + (N - N_P)}, \tag{9}$$

$$\bar{c}_P = \frac{1}{N_P(1+\tau)^{-1/(1-\alpha)} + (N - N_P)}(1+\tau)^{-1/(1-\alpha)}. \tag{10}$$

Finalement, on a

$$N_P = (1 - f(\theta))N \tag{11}$$

Les équations (1)-(11) déterminent les variables $\bar{c}_N, \bar{c}_P, \bar{R}, N_P, N, \theta, \bar{m}, \psi, r, \pi_N, \pi_P, \psi$.

4 L'optimum

Le planificateur social est utilitaire et maximise la somme des utilités de chaque agent:

$$V = \int_{k=0}^{k=1} \left(m_i + \beta \left[\int_0^N c_{ik}^{\alpha} di \right]^{1/\alpha} - \beta \left[\pi \int_0^{N_P} \bar{c}_{ik} di \right]^{\gamma} \right) dk,$$

avec

$$\begin{aligned} \bar{c}_i &= \int_0^1 c_{ik} dk, \\ \bar{m} &= \int_0^1 m_k dk \end{aligned}$$

et les contraintes

$$\int_0^N \bar{c}_i di = 1 \tag{12}$$

$$\theta N + \bar{m} = 1 \tag{13}$$

$$N_P = (1 - f(\theta))N \tag{14}$$

Par symétrie, chaque individu consommera la même quantité de bien polluant à l'optimum. De même pour les biens non polluants. Par homothéticité, le ratio c_P/c_N sera le même pour tous les individus, et égal à $\bar{c}_P/\bar{c}_N$. On peut donc se ramener au problème suivant:

$$\max_{\theta, N, \bar{c}_P, N_P, \bar{c}_N, \bar{m}} V = \bar{m} + \beta (N_P \bar{c}_P^{\alpha} + (N - N_P)\bar{c}_N^{\alpha})^{1/\alpha} - \beta(\pi N_P \bar{c}_P)^{\gamma},$$

sous les contraintes

$$\begin{aligned} \theta N + \bar{m} &= 1 \\ N_P &= (1 - f(\theta))N \\ N_P \bar{c}_P + (N - N_P)\bar{c}_N &= 1. \end{aligned}$$

En éliminant les variables $\bar{m}, N_P$ et $\bar{c}_N$ à l'aide des contraintes on obtient les trois conditions du premier ordre suivantes:

$$\frac{\partial V}{\partial \bar{c}_P} = 0, \Longleftrightarrow$$
$$(N_P \bar{c}_P^\alpha + (N - N_P)\bar{c}_N^\alpha)^{1/\alpha - 1} \left[N_P(c_P^{\alpha-1} - c_N^{\alpha-1})\right] = \gamma \left(\pi N_P\right)^\gamma c_P^{\gamma-1}. \qquad (15)$$

Le membre de gauche est l'utilité marginale d'augmenter la consommation de biens polluants d'une unité (ce qui réduit la consommation de biens non polluants). Le membre de droite est la désutilité marginale de l'augmentation correspondante de la pollution.

$$\frac{\partial V}{\partial N} = 0, \Longleftrightarrow$$
$$\frac{\beta}{\alpha}(N_P \bar{c}_P^\alpha + (N - N_P)\bar{c}_N^\alpha)^{1/\alpha - 1} \left[(1 - f(\theta))\bar{c}_P^\alpha + (f(\theta))\bar{c}_N^\alpha\right] = \theta. \qquad (16)$$

Le membre de droite est le coûit marginal, en terme de travail, d'inventer un bien supplémentaire. Le membre de gauche est son utilité marginale, égale au produit du facteur d'escompte β, et de l'utilité marginale d'un bien supplémentaire, égale à une moyenne pondérée de l'utilité marginale d'un bien polluant et de celle d'un bien non polluant.

$$\frac{\partial V}{\partial \theta} = 0, \Longleftrightarrow$$
$$\frac{\beta}{\alpha}(N_P \bar{c}_P^\alpha + (N - N_P)\bar{c}_N^\alpha)^{1/\alpha - 1} \left[(f'(\theta)N)(\bar{c}_N^\alpha - \bar{c}_P^\alpha)\right] + \beta\gamma(\pi \bar{c}_P N)^\gamma (1 - f(\theta))^{\gamma - 1} f'(\theta) = N. \qquad (17)$$

Le membre de droite est le coût marginal d'augmenter l'effort "écologique" sur tous les biens qu'on invente. Le membre de gauche est le gain en termes d'utilité, qui est la somme de deux termes. Le premier est le gain du au fait qu'on substitue des biens non polluants à des biens polluants, dû au fait que la quantité consommée de chaque bien est différente. Le second est le gain provenant de la réduction des émissions polluantes. On notera que le premier terme sera positif, dès lors que la pollution est taxée: la taxation sur la pollution augmente le surplus social d'une invention non polluante relativement à une invention polluante, parce que la consommation d'un bien non polluant est plus élevée. Cet effet est pris en compte par les innovateurs, mais pas entièrement, puisque la taxation augmente les profits d'une innovation non polluante relativement à une innovation polluante.

En substituant (15), cette équation peut être réécrite sous la forme:

$$\beta f'(\theta)(N_P\bar{c}_P^\alpha + (N - N_P)\bar{c}_N^\alpha)^{1/\alpha - 1}\left[\frac{1}{\alpha}(\bar{c}_N^\alpha - \bar{c}_P^\alpha) + \bar{c}_P(\bar{c}_P^{\alpha-1} - \bar{c}_N^\alpha)\right] = 1. \quad (18)$$

5 Comparaison entre l'optimum et l'équilibre.

Nous nous intéressons maintenant à la question suivante: peut-on implémenter l'optimum avec les instruments s_N, s_P et τ? Etant donné que ce dernier doit satisfaire à trois conditions d'optimalité (les équations (12)-(14) étant des contraintes technologiques satisfaites aussi bien à l'équilibre qu'à l'optimum), on peut génériquement choisir ces trois instruments de telle sorte que l'équilibre est un optimum. En substituant les équation d'équilibre (9) et (10) dans la condition du premier ordre (15), on trouve une équation que doit satisfaire le niveau de la taxe pour que l'équilibre soit un optimum:

$$\psi^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} N_p \tau = \gamma \left(\pi N_P\right)^{\gamma} \frac{(1+\tau)^{-(\gamma-1)/(1-\alpha)}}{\varphi^{\gamma-1}},$$

avec

$$\varphi = N_P(1+\tau)^{-1/(1-\alpha)} + N - N_P.$$

Cette équation implique, de façon non surprenante, que la taxe sera strictement positive dès lors qu'il existe une externalité de pollution, et qu'une hausse du paramètre prenant en compte la désutilité de la pollution, π, se traduit par une hausse de la taxe τ.

La substitution des équations d'équilibre (2)-(5) et (8)-(10) dans la conditions d'optimalité (18) implique que la différence entre la subvention à la R et D verte et la subvention à la R et D non verte doit satisfaire:

$$\frac{\mu}{\varphi}\left[\frac{1}{\alpha}(1-(1+\tau)^{-\frac{\alpha}{1-\alpha}}) + \tau(1+\tau)^{-\frac{1}{1-\alpha}} - \frac{\mu-1}{\mu}(1-(1+\tau)^{-\frac{1}{1-\alpha}})\right] = s_N - s_P.$$

Le membre de gauche est toujours positif, pour deux raisons.

D'une part, on a $\mu = 1/\alpha$, soit $\frac{\mu-1}{\mu} = 1-\alpha$, et l'inégalité

$$\frac{1}{\alpha}(1-(1+\tau)^{-\frac{\alpha}{1-\alpha}}) \geq (1-\alpha)(1-(1+\tau)^{-\frac{1}{1-\alpha}})$$

est toujours satisfaite. Elle signifie que la différence de profits entre une innovation verte et une innovation polluante (proportionnelle à $(1-\alpha)(1-(1+$

$\tau)^{-\frac{1}{1-\alpha}})$), sous estime la différence de surplus social entre ces deux innovations (proportionnelle à $\frac{1}{\alpha}(1-(1+\tau)^{-\frac{\alpha}{1-\alpha}})$), parce que les profits ne sont qu'une fraction du surplus social (*effet de compression).* Cette propriété est plausible est toujours vraie avec la spécification que nous utilisons, mais on peut probablement concevoir des exemples où la courbe de demande est telle que le ratio profit/surplus social est nettement plus élevé pour une innovation non polluante que pour une innovation polluante, de sorte qu'on pourrait avoir un excès d'innovation non polluante. Pour la plupart des spécifications, cependant, on s'attend à ce que le ratio profit/surplus social ne soit pas trop sensible, de sorte que la différence de profits sous-estime la différence de surplus social.

D'autre part, le terme entre crochets contient un terme en $\tau(1+\tau)^{-\frac{1}{1-\alpha}}$, qui est positif puisque $\tau > 0$. Ce terme représente le fait qu'à niveau de taxation donné, une hausse de l'innovation verte a un effet direct sur la réduction de la pollution, puisque le nombre de biens polluants est plus faible. En d'autres termes, la réduction de la pollution passe par une action sur deux marges: une marge intensive qui consiste à réduire la quantité consommée de chaque bien polluant relativement à chaque bien non polluant, et qui réagit à la taxe sur les émissions; et une marge extensive qui consiste à réduire le nombre de biens polluants, et qui réagit à la différence de subvention à la Ret D entre les deux types de biens.

Enfin, la substitution des mêmes équations dans la condition d'optimalité (16) donne le niveau moyen de la subvention totale à la R et D. On trouve que la subvention totale à la recherche doit satisfaire à

$$N\bar{s} = \frac{\mu\psi}{\alpha\varphi(\mu-1)} - 1,$$

où $\bar{s} = f(\theta)s_N + (1-f(\theta))s_P$ est la subvention moyenne à une innovation.

Le membre de droite est toujours positif, car

$$\frac{1}{\alpha}\psi > (1-\alpha)\varphi.$$

Cette différence prend en compte la différence entre le surplus social d'une innovation (proportionnel à ψ/α), et le profit qu'elle engendre pour l'entreprise (proportionnel à $(\mu-1)\varphi/\mu = (1-\alpha)\varphi$).

Donc, la subvention globale à l'innovation sera toujours positive, mais la subvention nette à l'innovation non verte peut être positive ou négative, tandis que la subvention à l'innovation verte est toujours positive et supérieure à la subvention à l'innovation polluante.

On pourrait comparer cette solution à une solution "réglementée" où les biens polluants ne sont pas autorisés. Une telle solution est un cas particulier du problème précédent correspondant à $\tau = \infty$ et $s_P = -\pi_P = 0$. Elle ne correspond pas en général à l'optimum; typiquement, à s_N donné, elle implique un effort plus important pour que les innovations soient non polluantes (car (5) devient $\frac{f'(\theta)}{1+r}(\pi_N + s_P) = 1$, ce qui implique une valeur plus grande de θ), mais également un niveau d'innovation plus faible (car le membre de droite de (6) est plus élevé du fait de la hausse de θ, tandis que son membre de gauche est plus faible, toutes choses égales par ailleurs, du fait de la perte des revenus liés aux innovations polluantes. Pour compenser π_N doit augmenter, ce qui signifie que N doit diminuer).

On peut également tenter de comparer le niveau de la taxe à l'optimum de premier rang à son niveau dans un monde de second rang où – par exemple pour des raisons d'observabilité – il n'est pas possible de verser une prime différente aux innovations non polluantes. Malheureusement il s'avère très difficile d'établir des résultats analytiques à ce sujet.

6 Conclusion

Dans le cadre du modèle développé ci-dessus, l'optimum de premier rang peut être atteint à l'aide de trois instruments: taxation sur la pollution, prime générale à l'innovation, et primes spécifiques aux innovations non polluantes. On a montré qu'il est optimal que ces primes spécifiques soient strictement positives, même si la taxation sur la pollution a elle-même des effets sur la profitabilité qui rendent l'innovation verte plus rentable que l'innovation polluante.

Ces résultats semblent corroborer ceux que l'obtient à l'aide d'un modèle plus complet de croissance endogène. Le modèle empirique d'équilibre général en croissance endogène développé à l'université de Toulouse (Voir Saint-Paul, 2002) implique que les effets d'une subvention à la R et D verte sont beaucoup plus forts que ceux de la taxation sur le carbone. La subvention à la R et D verte permet une réduction substantielle des émissions à long terme, tandis que la taxation sur le carbone est plus efficace à court terme. Cependant, une subvention à la R et D verte n'a qu'un effet de niveau sur les émissions. Celles-ci continuent à croître indéfiniment si l'économie croît. Pour obtenir une réduction des émissions, et- éventuellement un sentier de développement durable où les émissions diminuent au cours du temps bien que la croissance soit positive, une taxe sur les émissions qui croît de manière exponentielle est nécessaire. Cela suggère à nouveau que les deux instruments - taxation des polluants et subvention à la R et D - sont complémentaires.

L'analyse peut être nuancée si l'on prend en compte le rôle de l'incertitude sur les paramètres. Une taxation sur les émissions réduit les émissions quels que soient les paramètres représentant le comportement sous-jacent de l'économie. Inversement, une subvention à la recherche verte accroît toujours celle-ci, mais l'effet final sur les émissions dépend du degré de substituabilité entre biens et entre technologies. Une invention qui réduit l'intensité énergétique d'un bien, par exemple, peut conduire à une hausse de la consommation totale d'énergie si elle déclenche une forte hausse de la consommation de ce bien, c'est à dire s'il existe beaucoup de possibilité de substitutions entre ce bien et d'autres bien. S'il existe une incertitude quant à ces possibilités de substituabilités, la subvention à la R et D verte est une stratégie plus risquée pour réduire les émissions.

REFERENCES

Bovenberg, A. Lans, and Sjak Smulders (1995), "Environmental quality and pollution-augmenting technological change in a two-sector endogenous growth model", *Journal of Public Economics*, 57, 369-391

——————— and —————— (1996), "Transitional impacts of environmental policy in an endogenous growth model", *International Economic Review*, 861-893.}

Grimaud, A. (2002), ""Non Convexities, Imperfect Competition and Growth", document de travail IDEI.

Saint-Paul, G. (2002), " Environmental policy and directed innovation in a Schumpeterian growth model.", document de travail, université de Toulouse.