

“Politiques de R&D, Taxe Carbone et Paradoxe Vert”

André Grimaud, Mauricio Bermudez Neubauer and Luc Rougé

# Politiques de R&D, Taxe Carbone et Paradoxe Vert

Mauricio Bermudez Neubauer<sup>a</sup>, André Grimaud<sup>b</sup> et Luc Rouge<sup>c,d</sup>

**Résumé :** Nous étudions une économie dans laquelle un bien final est produit grâce à deux secteurs. L'un utilise une ressource non-renouvelable et polluante, l'autre une ressource renouvelable et propre. A chacune est associé un type de recherche spécifique. Les pouvoirs publics prélèvent une taxe carbone et, simultanément, subventionnent les deux secteurs de recherche. Nous étudions l'impact de ce dispositif sur le rythme d'extraction de la ressource et les émissions polluantes.

La subvention à la recherche dédiée au secteur propre va à l'encontre des effets de la taxe carbone. Si cette taxe génère un paradoxe vert, la subvention le modère ; si la taxe ralentit l'extraction de la ressource, la subvention crée un paradoxe vert.

**Abstract:** We study an economy in which a final good is produced by two sectors. One uses a non-renewable and polluting resource, the other a renewable and clean resource. A specific type of research is associated to each sector. The public authorities levy a carbon tax and simultaneously subsidize both research sectors. We study the impact of such a policy scheme on the rate of resource extraction and emissions.

The subsidy to research in the clean sector goes in the opposite direction of the effects of the carbon tax. If the tax creates a green paradox, the subsidy moderates it; if the tax slows down resource extraction, then the subsidy generates a green paradox.

**Mots-clés :** paradoxe vert, politique de R&D, progrès technique dédié, taxe carbone

**Keywords:** carbon tax, directed technical change, green paradox, R&D policy

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

---

<sup>a</sup> Accenture, 30 Fenchurch Street, EC3M 3BD, London, United Kingdom

<sup>b</sup> Université de Toulouse, Toulouse School of Economics (IDEI and LERNA), Manufacture des Tabacs, 21 Allée de Brienne, 31000 Toulouse, et Toulouse Business School.

<sup>c</sup> **Auteur correspondant.** Université de Toulouse, Toulouse Business School, 20 Bd Lascrosses, 31068 Toulouse Cedex 7. E-mail: [l.rouge@esc-toulouse.fr](mailto:l.rouge@esc-toulouse.fr) Tel: +33 5 61 29 48 20 Fax: +33 5 61 29 49 94

<sup>d</sup> Les auteurs remercient deux rapporteurs anonymes pour leurs commentaires et leurs suggestions, ainsi que Julien Daubanes.

# Introduction

Le changement climatique peut être combattu par différentes voies. D'une part, il faut limiter l'utilisation des énergies fossiles, qui est à l'origine des principales émissions de carbone anthropogéniques. A niveau d'utilisation donné, il s'agit ensuite de réduire les émissions grâce à des technologies comme la séquestration du carbone, et, à émissions données, de réduire leur impact en prenant des mesures d'adaptation. Il faut également encourager le recours aux énergies renouvelables et propres telles que l'énergie solaire ou l'énergie éolienne. Enfin, il convient d'encourager la recherche et développement (R&D) dans différents domaines, comme celui de l'efficacité énergétique ou celui de l'intensité en carbone. Afin de mettre en œuvre cette lutte contre le changement climatique, la littérature économique préconise plusieurs types de politiques publiques. L'une des plus notables consiste à renchérir le prix des énergies fossiles à travers une taxe carbone ou encore des marchés de droits à polluer comme le Système Européen d'Echange de Quotas d'Emission de gaz à effet de serre (European Union Emissions Trading Scheme, ou EU-ETS). Parallèlement, des subventions directes aux énergies renouvelables sont recommandées, tout comme des subventions aux différents types de R&D.

Cependant, des travaux récents ont montré que ces politiques, qui ont pour but commun de réduire le recours aux énergies polluantes, ont parfois des effets inattendus et néfastes. Plus précisément, certaines d'entre elles peuvent conduire à une modification du profil temporel d'utilisation des ressources fossiles, impliquant une utilisation plus forte à court-terme, et donc des émissions de carbone plus importantes dans les premières années. Suivant Sinn (2008), on parle alors de "paradoxe vert" ; en effet, il s'agit de politiques environnementales qui ont pour impact paradoxal de détériorer la situation environnementale - au moins à court-terme. Pour un survol de cette littérature, on pourra par exemple se référer à van der Werf et Di Maria (2012). Différents types de politiques ont été ainsi étudiées à travers ce prisme. Il peut s'agir de la taxation de l'utilisation des ressources polluantes ou bien des émissions polluantes elles-mêmes (voir par exemple Sinn, 2008 ou Hoel, 2010), ou de subventions à des substituts verts comme dans Grafton et al. (2010), Gerlagh (2011) ou encore van der Ploeg et Withagen (2012). On peut considérer que des politiques d'incitation à l'innovation dans le domaine des énergies renouvelables et propres s'inscrivent dans ce schéma. Cependant, en étudiant l'impact de politiques de recherche verte sur le rythme d'extraction d'une ressource polluante, Daubanes et al. (2012) montrent qu'un paradoxe vert n'apparaît pas.

Néanmoins, étudier l'impact de ces politiques prises isolément peut avoir des limites. En effet, si l'on suit les recommandations habituelles des économistes, elles sont généralement vues comme complémentaires, et sont donc susceptibles d'être menées de front. Il conviendrait donc d'étudier leurs effets joints. Nous étudions ainsi une économie dans laquelle les autorités publiques mettent conjointement en place une taxe sur les émissions de carbone et des subventions à la recherche. Nous montrons que si les effets de ces deux types de politiques peuvent aller dans le même sens et donc se renforcer mutuellement, ils peuvent également être opposés. Dans certains cas, la nature d'une des deux politiques détermine l'impact de l'autre.

Pour étudier ces questions, nous utilisons un modèle de croissance endogène avec innovations verticales à la Aghion et Howitt (1998) et progrès technique dédié au sens d'Acemoglu (2002). La production de bien final requiert deux inputs globaux, chacun étant lui-même produit à partir d'une ressource naturelle, et de la connaissance et des biens intermédiaires qui lui sont

spécifiques. L'une de ces deux ressources est non-renouvelable et polluante, l'autre est renouvelable et propre. Par commodité, nous ferons référence à ces ressources, ainsi qu'aux biens intermédiaires associés, en tant que "sales" et "propres". Enfin, dans cette étude, nous considérons que les pouvoirs publics mènent deux politiques simultanées : une taxe est prélevée sur les émissions de carbone et les profits des deux secteurs de recherche sont subventionnés.

Formellement, notre cadre d'analyse est proche de celui d'Acemoglu et al. (2012). Néanmoins, deux éléments distinguent notre modèle du leur. Premièrement, le temps est ici une variable continue. Deuxièmement, nous nous focalisons sur le cas dans lequel la ressource polluante est non-renouvelable et son stock est asymptotiquement extrait sur l'horizon temporel étudié. Par ailleurs, si nous retrouvons le cas obtenu par Acemoglu et al. dans lequel la recherche dans le secteur propre est inactive, le principal objet de cet article est d'étudier l'interaction entre la taxe carbone et les politiques de R&D lorsque ces dernières ont permis d'atteindre l'équilibre dans lequel les deux secteurs de recherche sont actifs.

Nous montrons que la subvention atténue les effets de la taxe carbone sur l'extraction de la ressource et les émissions de carbone, que celle-ci les accélère ou qu'elle les ralentisse : si la taxe accélère l'extraction de la ressource, produisant ainsi un paradoxe vert, l'adjonction de la subvention à la recherche dans le secteur propre le tempère. De façon symétrique, si la taxe carbone retarde l'extraction de la ressource, comme cela est généralement préconisé dans la littérature (voir Withagen, 1994, par exemple), la subvention a pour effet inverse de l'accélérer, ce qui constitue ici une forme de paradoxe vert.

Nous présentons le modèle et le comportement des agents dans la section suivante. Nous caractérisons l'équilibre de l'économie décentralisée dans la troisième section, et la quatrième section est consacrée à l'étude de l'impact des politiques économiques. Enfin, nous discutons des implications de nos résultats en termes de politique économique dans la cinquième section. Pour finir, nous concluons dans la dernière section.

## Modèle et comportement des agents

### Secteur du bien final

A toute date  $t \in [0, +\infty)$ , une entreprise produit une quantité  $Y(t)$  de bien final selon la technologie CES suivante :

$$(1) \quad Y(t) = [Y_c(t)^a + Y_d(t)^a]^{1/a},$$

où  $-\infty < a < 1$ ,  $1/(1-a)$  étant l'élasticité de substitution.

$Y_c(t)$  et  $Y_d(t)$  sont, respectivement, un input propre et un input sale (les indices  $c$  et  $d$  seront utilisés par la suite pour "clean" et "dirty"), dans le sens où ils sont produits respectivement à partir d'énergie propre, comme l'énergie solaire ou éolienne, et d'énergie polluante, comme les énergies fossiles. Leurs fonctions de production sont les suivantes.

$$(2) \quad Y_c(t) = Q(t)^{1-\alpha} \int_0^1 A_{ci}(t)^{1-\alpha} x_{ci}(t)^\alpha di, \text{ où } 0 < \alpha < 1,$$

$$(3) \quad Y_d(t) = R(t)^{1-\alpha} \int_0^1 A_{di}(t)^{1-\alpha} x_{di}(t)^\alpha di.$$

$Q(t)$  est la quantité d'énergie propre utilisée à la date  $t$ , et  $R(t)$  le flux de ressource non-renouvelable ; l'utilisation de cette ressource génère un flux de pollution  $P(t) = hR(t)$ ,  $h > 0$ . Dans chaque secteur, propre et sale, il y a un continuum de biens intermédiaires, indexés sur un intervalle unitaire.  $x_{ji}(t)$ ,  $i \in [0,1]$ , est la quantité de bien intermédiaire  $i$  utilisé dans la production de  $Y_j(t)$ , avec  $j = \{c, d\}$ .  $A_{ji}(t)$  est la qualité du bien intermédiaire  $i$  dans le secteur  $j$  ;  $A_j(t) = \int_0^1 A_{ji}(t) di$  est la productivité moyenne dans le secteur  $j$ .

Nous normalisons le prix du bien final à 1, et nous notons respectivement  $p_{ji}(t)$ ,  $p_Q(t)$  et  $p_R(t)$  le prix du bien  $i$  dans le secteur  $j$ , le prix de la ressource propre et le prix de la ressource non-renouvelable. De plus, nous supposons que la politique environnementale dans ce secteur consiste en une taxe unitaire,  $\tau(t)$ , sur la pollution. Le profit de l'entreprise produisant le bien final est donc

$$\pi_Y(t) = [Y_c(t)^a + Y_d(t)^a]^{1/a} - \int_0^1 p_{ci}(t) x_{ci}(t) di - \int_0^1 p_{di}(t) x_{di}(t) di - p_Q(t) Q(t) - p_R(t) R(t) - \tau(t) h R(t).$$

En maximisant  $\pi_Y(t)$  par rapport à  $R(t)$ ,  $x_{ji}(t)$  et  $Q(t)$ , on obtient les trois conditions du premier ordre suivantes, qui déterminent les fonctions de demande inverse de ces trois inputs :

$$(4) \quad p_R^*(t) = \frac{(1-\alpha)Y(t)}{R(t)} \frac{1}{[Y_c(t)/Y_d(t)]^a + 1},$$

où  $p_R^*(t) = p_R(t) + h\tau(t)$  est le prix global (c'est-à-dire le prix taxe comprise) payé par l'entreprise pour l'utilisation de la ressource,

$$(5) \quad p_{ji}(t) = x_{ji}(t)^{\alpha-1} \Theta_j(t),$$

où<sup>1</sup>  $\Theta_c(t) = \alpha Y(t)^{1-a} Y_c(t)^{a-1} [Q(t) A_c(t)]^{1-\alpha}$  et  $\Theta_d(t) = \alpha Y(t)^{1-a} Y_d(t)^{a-1} [R(t) A_d(t)]^{1-\alpha}$ , et

$$(6) \quad p_Q(t) = (1-\alpha) Y(t)^{1-a} Q(t)^{a(1-\alpha)-1} \left[ \int_0^1 A_c(t)^{1-\alpha} x_{ci}(t)^\alpha di \right]^a.$$

## Secteur des biens intermédiaires

Les biens intermédiaires sont produits à partir de bien final par un continuum d'entreprises selon la fonction de production suivante :

---

<sup>1</sup> Comme cela est standard, nous supposons  $A_{ji}(t) = A_j(t)$  (voir par exemple Cozzi et al., 2007).

$$(7) \quad x_{ji}(t) = (1/\psi)y_{ji}(t), \quad j = \{c, d\}, \quad i \in [0, 1] \text{ et } \psi > 0.$$

Ainsi, le profit de l'entreprise produisant le bien intermédiaire  $i$  dans le secteur  $j$  s'écrit

$$(8) \quad \pi_{ji}(t) = x_{ji}(t)[p_{ji}(t) - \psi]$$

En remplaçant  $p_{ji}(t)$  par (5) dans cette fonction de profit, et en la maximisant par rapport à  $x_{ji}(t)$ , on obtient  $x_{ji}(t) \equiv x_j(t) = [\psi/\alpha\Theta_j(t)]^{1/(\alpha-1)}$  pour tout  $i$ . Grâce à l'équation (5), on obtient

$$(9) \quad p_{ji}(t) \equiv p = \psi/\alpha.$$

Ceci implique notamment que  $\pi_{ji}(t) \equiv \pi_j(t)$  pour tout  $i$ .

## Secteur de la R&D

Conformément à ce que nous avons déjà présenté plus haut, et dans l'esprit de la littérature sur le progrès technique dédié, il y a deux types de recherche : une recherche dédiée au secteur propre et une recherche dédiée au secteur sale. A toute date  $t$ , la quantité de travail qualifié dédiée à la recherche de type  $j$  ( $j = \{c, d\}$ ) est  $L_j(t) = \int_0^1 L_{ji}(t) di$ , où  $L_{ji}(t)$  est la quantité de travail qualifié consacrée à l'amélioration de la qualité du bien intermédiaire  $i$ ,  $i \in [0, 1]$ .

Contrairement à Acemoglu et al. (2012), le temps est ici continu, mais notre formalisation reste proche de la leur. Chaque chercheur dans le secteur  $j$  a une probabilité instantanée de parvenir à une innovation constante dans le temps et spécifique à ce secteur,  $\sigma_j \in (0, 1)$ . Dans un tel cas, la qualité  $A_{ji}(t)$  augmente de  $\gamma A_{ji}(t)$  avec  $\gamma > 0$ , ce qui signifie que la nouvelle version du bien intermédiaire associé est plus productive ; si l'innovation n'a pas eu lieu,  $A_{ji}(t)$  demeure inchangé. Donc, à toute date  $t \geq 0$ , étant donné le niveau  $A_{ji}(t)$  et la quantité de travail  $L_{ji}(t)$ , on peut établir que l'augmentation espérée de  $A_{ji}(t)$  est donnée par la loi de mouvement standard

$$(10) \quad \dot{A}_{ji}(t) = \gamma A_{ji}(t) \sigma_j L_{ji}(t), \quad \forall j = c, d, \quad \forall i \in [0, 1].$$

Dans Acemoglu et al. (2012), où le temps est discret, l'innovateur accède à une situation de monopole dont la durée correspond à l'intervalle de temps le plus court dans leur cadre d'analyse : une période. Nous transcrivons cette hypothèse en supposant que la situation de monopole a une durée  $dt$ . En d'autres termes, quand une innovation - engendrant un nouveau type de bien intermédiaire plus productif  $x_{ji}(t)$ ,  $j = c, d$ ,  $i \in [0, 1]$  - a lieu à la date  $t \geq 0$ , l'innovateur bénéficie d'un droit de propriété exclusif uniquement sur le profit  $\pi_j(t)dt$  retiré de la vente du

nouveau bien intermédiaire sur la période  $(t, t + dt)$ .

Par ailleurs, les politiques de soutien à la R&D consistent simplement à subventionner les profits des innovateurs. Nous notons  $\varphi_j(t) \geq 1$  le taux de subvention appliqué aux profits de tout innovateur dans le secteur  $j = c, d$ . Ainsi, la valeur d'une innovation (incluant la subvention) est

$$(11) \quad V_{ji}(t) = V_j(t) = \varphi_j(t)\pi_j(t)dt,$$

où, en utilisant l'équation (8) avec le prix d'équilibre (9),  $\pi_j(t)$  est donné par :

$$(12) \quad \pi_j(t) = \frac{(1-\alpha)\psi}{\alpha} x_j(t).$$

Le profit du secteur de R&D associé au bien intermédiaire  $i$  dans le secteur  $j$  s'écrit

$$(13) \quad \pi_{R\&Dji}(t) = [\sigma_j V_j(t) - w(t)]L_{ji}(t),$$

où  $w(t)$  est le salaire des chercheurs et  $V_j(t)$  est donné par (11).

Nous reprenons la condition de libre entrée sur le marché de la recherche telle qu'elle est énoncée dans Acemoglu (2009, Chapitre 15, page 507) :

$$\begin{aligned} \sigma_j V_j(t) &\leq w(t) \text{ si } L_j(t) \geq 0, \\ \text{et } \sigma_j V_j(t) &= w(t) \text{ si } L_j(t) > 0. \end{aligned}$$

Ici, deux cas peuvent se présenter. Le premier est une solution intérieure dans laquelle  $L_c(t)$  et  $L_d(t)$  sont tous deux strictement supérieurs à 0. Dans ce cas,  $\pi_{R\&Dji}(t) = 0$ , ce qui implique  $\sigma_j V_j(t) = w(t)$ ,  $j = c, d$ . En utilisant (11), on obtient  $\sigma_j \varphi_j(t) \pi_j(t) dt = w(t)$ . Alors, avec (8) et (9), il vient

$$(14) \quad \frac{x_c(t)}{x_d(t)} \equiv X(t) = \frac{\varphi_d(t)\sigma_d}{\varphi_c(t)\sigma_c}.$$

Cette condition de non arbitrage entre les deux secteurs de recherche implique notamment qu'une augmentation de la subvention à la recherche dans le secteur propre  $\varphi_c(t)$  génère une augmentation de la production de biens intermédiaires sales relativement à la production de biens intermédiaires propres. Nous approfondirons ce point lorsque nous étudierons l'impact des politiques économiques.

Le deuxième cas consiste en une solution en coin dans laquelle l'un des deux flux de travail est nul. Par souci de réalisme, nous retenons ici le cas où c'est le travail dans la recherche dédiée au secteur propre qui est nul :  $L_c(t) = 0$  et  $L_d(t) = 1$ . Dans ce cas, nous avons  $\sigma_c V_c(t) < w(t)$  et  $\sigma_d V_d(t) = w(t)$ . Avec l'équation (11), nous en déduisons :  $\sigma_c \varphi_c(t) \pi_c(t) < \sigma_d \varphi_d(t) \pi_d(t)$ .

Combinée aux équations (8) et (9), cette inégalité donne :

$$(15) \quad \frac{x_c(t)}{x_d(t)} \equiv X(t) < \frac{\varphi_d(t)\sigma_d}{\varphi_c(t)\sigma_c}.$$

Nous supposons donc que l'économie est initialement dans un équilibre en coin et que l'introduction à la date 0 (date à laquelle débute notre analyse) des deux subventions ne modifie pas cet état, de sorte que (15) est vérifiée à la date 0 : l'introduction des subventions de suffit pas à initier une activité dans la recherche dédiée au secteur propre. Nous montrons dans la section « Allocation des efforts de R&D » ci-dessous comment la dynamique des subventions amène l'économie à converger vers un équilibre intérieur.

## Secteurs des deux ressources

Le flux de ressource non-renouvelable  $R(t)$  est extrait d'un stock fini  $S(t)$  :  $\dot{S}(t) = -R(t)$ . Nous notons  $r(t)$  le taux d'intérêt de l'économie. Puisque nous supposons les coûts d'extraction négligeables, la fonction de profit du secteur minier est  $\int_t^{+\infty} p_R(s)R(s)e^{-\int_t^s r_u du} ds$ . La condition du premier ordre de la maximisation de ce profit est la condition d'Hotelling standard dans l'économie décentralisée :

$$(16) \quad g_{p_R}(t) = r(t).$$

La ressource propre est simplement produite à partir d'un flux de travail non qualifié  $L_Q$  constant et exogène.

## Ménages

Le bien final a trois utilisations alternatives, que sont la production de biens intermédiaires propres et sales, et la consommation,  $C(t)$  :

$$(17) \quad Y(t) = C(t) + \int_0^1 y_{ci}(t)di + \int_0^1 y_{di}(t)di.$$

Nous supposons que l'utilité du ménage représentatif est une fonction croissante du niveau de consommation de bien final. La fonction d'utilité intertemporelle s'écrit  $U_0 = \int_0^{+\infty} \ln C(t)e^{-\rho t} dt^2$ , où

---

<sup>2</sup> On pourrait introduire dans cette fonction le stock de carbone accumulé. Ceci permettrait de mener une analyse de bien-être, ce qui n'est pas l'objet de notre étude. Notons que si la fonction d'utilité est additivement séparable, cela ne modifie en rien nos résultats à l'équilibre général de l'économie décentralisée, car la condition de Ramsey-Keynes n'est pas affectée.

$\rho$  est le taux d'escompte psychologique. Le ménage a une contrainte budgétaire  $\dot{b}(t) = r(t)b(t) + w(t) + p_R(t)R(t) - T(t) - C(t)$ , où  $b(t)$  est le stock de titres à la date  $t$ , et  $T(t)$  est une taxe (ou une subvention) prélevée de façon forfaitaire par le gouvernement afin d'équilibrer son budget.

Le ménage est doté à chaque instant d'une quantité de travail non qualifié constante et exogène  $L_Q$  qui est utilisée dans le secteur de production de la ressource propre, et d'une quantité de travail qualifié constante  $L$ , que nous normalisons à 1. Comme nous l'avons vu, le travail qualifié a deux utilisations : la recherche dédiée au secteur propre ( $L_c(t)$ ) et la recherche dédiée au secteur sale ( $L_d(t)$ ) :  $1 = L_c(t) + L_d(t)$ .

La maximisation de la fonction d'utilité intertemporelle sous la contrainte budgétaire conduit à la condition de Ramsey-Keynes habituelle :

$$(18) \quad g_c(t) = r(t) - \rho.$$

## Equilibre de l'économie décentralisée

Nous nous concentrons ici sur les variables d'équilibre général nécessaires à l'étude des effets joints de la taxe carbone et des subventions à la R&D.

### Dynamique de l'utilisation de la ressource sale

En remplaçant (2) et (3) dans (5), et en utilisant (9), nous obtenons la condition d'équilibre

$$(19) \quad Y_c(t)^a / Y_d(t)^a = x_c(t) / x_d(t) = X(t).$$

Nous pouvons donc réécrire (4) comme suit :

$$(20) \quad R(t) = \frac{(1-\alpha)Y(t)}{p_R^*(t)} \frac{1}{\Phi(t)},$$

où  $\Phi(t) = X(t) + 1$ .

A partir des équations (7) et (17), et du fait que  $x_{ji}(t) \equiv x_j(t)$ , nous pouvons écrire  $Y(t) = C(t) + \psi\alpha_c(t) + \psi\alpha_d(t)$ . Ainsi, en utilisant (5), (9) et (1), nous pouvons voir que la consommation est une fraction constante de la production de bien final :  $C(t) = Y(t)(1 - \alpha^2)$ . Ceci implique  $g_Y(t) = g_C(t) = r(t) - \rho$  (voir la condition (18)).

En log-differentiant  $R(t)$  - donné par (20) -, et en utilisant la condition (16), on obtient le taux de croissance de l'utilisation de la ressource :

$$(21) \quad g_R(t) = -\rho - g_{(p_R^*/p_R)}(t) - g_\Phi(t),$$

où

$$(22) \quad g_\Phi(t) = \frac{-X(t)}{1+X(t)} g_X(t).$$

Rappelons ici que l'équilibre décentralisé que nous étudions est conditionné par deux politiques économiques : une taxe carbone  $\tau(t)$  et deux subventions à la R&D,  $\varphi_c(t)$  et  $\varphi_d(t)$ . Nous observons grâce à l'équation (21) que la taxe carbone affecte le rythme d'extraction de la ressource à travers le canal de la variable  $g_{(p_R^*/p_R)}(t)$ , c'est-à-dire la différence entre le taux de croissance du prix global de la ressource ( $p_R^*(t)$ ) et le taux de croissance de son prix "producteur" ( $p_R(t)$ ), qui est égal au taux d'intérêt  $r(t)$  (voir la condition d'Hotelling (16)). Plus précisément, et conformément aux enseignements de la littérature (voir par exemple Dasgupta et al., 1981), une politique telle que  $p_R^*(t)$  croît plus vite (respectivement, moins vite) que  $p_R(t)$  - c'est-à-dire  $g_{p_R^*}(t) > g_{p_R}(t)$  (resp.,  $g_{p_R^*}(t) < g_{p_R}(t)$ ) - a pour effet d'accélérer (resp. ralentir) l'extraction de la ressource.

Ici, le rapport  $p_R^*(t)/p_R(t)$  est égal à  $1+h\tau(t)/p_R(t)$ . Afin de simplifier l'analyse, nous supposons que  $\tau(t) = \tau(0)e^{\int_0^t [r(s)+\delta] ds}$ , c'est-à-dire,  $g_\tau(t) = r(t) + \delta$ , où  $\delta$  est une constante fixée par le gouvernement. L'équation (21) montre que, suivant la valeur de  $\delta$ ,  $g_R(t)$  est plus grand ou plus petit que  $-\rho - g_\Phi(t)$ , sa valeur en l'absence de taxe. Formellement, nous avons trois cas. Quand  $\delta > 0$ , c'est-à-dire,  $g_\tau(t) > r(t)$ , nous avons  $g_R(t) < -\rho - g_\Phi(t)$  : ce profil de taxe accélère donc l'extraction de la ressource. Dans le cas opposé,  $\delta < 0$ , c'est-à-dire  $g_\tau(t) < r(t)$ , nous avons  $g_R(t) > -\rho - g_\Phi(t)$  ; en d'autres termes, cet autre profil de taxe ralentit l'extraction. Enfin, si  $\delta = 0$ , ou encore  $g_\tau(t) = r(t)$ , alors  $g_R(t) = -\rho - g_\Phi(t)$  : une taxe croissant au rythme du taux d'intérêt ne modifie pas le taux de croissance de l'extraction de la ressource.

Après différentiation, nous obtenons  $g_{(p_R^*/p_R)}(t) = [g_\tau(t) - g_{p_R}(t)] \frac{h\tau(t)/p_R(t)}{1+h\tau(t)/p_R(t)}$ . Puisque, grâce à l'équation (16), nous savons que  $g_{p_R}(t) = r(t)$ , nous avons  $g_{(p_R^*/p_R)}(t) = \delta \frac{h\tau(t)/p_R(t)}{1+h\tau(t)/p_R(t)}$ . Comme  $\tau(t) = \tau(0)e^{\int_0^t [r(s)+\delta] ds}$ , et  $p_R(t) = p_R(0)e^{\int_0^t r(s) ds}$ , nous obtenons  $\tau(t)/p_R(t) = \tau(0)e^{-\delta t} / p_R(0)$ . Donc, nous pouvons réécrire (21) comme suit

$$(23) \quad g_R(t) = -\rho - \frac{\delta}{p_R(0)e^{-\delta t} / h\tau(0) + 1} - g_\Phi(t).$$

Nous observons ici que le taux de croissance de l'utilisation de la ressource dépend directement du niveau de son prix initial,  $p_R(0)$ . Nous revenons sur ce point important dans la section

"Politiques économiques et paradoxe vert".

## Allocation des efforts de R&D

Nous analysons ici l'activité des deux secteurs de recherche - nous retrouvons pour l'essentiel les résultats d'Acemoglu et al. (2012). A partir de ce point, la section suivante va nous permettre d'étudier les impacts combinés de la taxe et des subventions à la recherche.

Nous avons vu (dans la section "Secteur de la recherche et développement") que l'économie est dans un équilibre intérieur - c'est-à-dire que  $0 < L_j(t) < 1$ ,  $j = c, d$  - si  $X(t)$  est égal à  $\varphi_d(t)\sigma_d / \varphi_c(t)\sigma_c$  (équation (14)). Elle est dans un équilibre en coin - ici,  $L_c = 0$  et  $L_d = 1$  - si  $X(t)$  est inférieur à  $\varphi_d(t)\sigma_d / \varphi_c(t)\sigma_c$  (inéquation (15)). Comme nous l'avons vu, nous supposons que c'est le cas à la date 0 : il n'y a pas de travail dans la recherche dédiée au secteur propre et donc  $X(0) < \varphi_d(0)\sigma_d / \varphi_c(0)\sigma_c$  (cela renvoie au cas retenu par Acemoglu et al., 2012). Pour savoir si cette économie va atteindre un équilibre intérieur, en d'autres termes si le secteur de la recherche dans le secteur propre va devenir actif, il convient d'étudier la dynamique de  $X(t)$ . Nous montrons dans l'Annexe 1 que le signe de  $g_X(t)$  dépend de celui de  $a$ , c'est-à-dire de la substituabilité des inputs propre et sale.

Si  $a < 0$ , alors  $g_X(t) > 0$  ; dans ce cas,  $X(t)$  converge vers  $\sigma_d\varphi_d(t) / \sigma_c\varphi_c(t)$  et atteint cette valeur à la date  $t_0$ . Ici, même si les autorités publiques n'interviennent pas, l'économie converge naturellement vers une situation d'équilibre intérieur, c'est-à-dire une situation dans laquelle les deux secteurs de recherche sont simultanément actifs. De plus, la mise en œuvre de politiques économiques peut hâter cette convergence. L'équation (15) montre que si  $\varphi_c(t) / \varphi_d(t)$  augmente, c'est-à-dire si la subvention à la recherche dans le secteur propre augmente plus vite que la subvention dans le secteur sale, alors la borne supérieure de  $X(t)$ ,  $\varphi_d(t)\sigma_d / \varphi_c(t)\sigma_c$ , diminue. En d'autres termes, plus la politique de recherche sera orientée vers le secteur propre, plus rapidement  $X(t)$  atteindra cette borne supérieure, et donc plus rapidement la solution intérieure sera atteinte.

Si  $a > 0$ , alors  $g_X(t) < 0$ . Dans ce cas,  $X(t)$  converge vers 0 ; en d'autres termes, l'économie reste dans une situation en coin dans laquelle seul le secteur de la recherche sale est actif. On retrouve ici le cas de "désastre environnemental" évoqué par Acemoglu et al. (2012). Néanmoins, ici également, les politiques de recherches peuvent conduire l'économie à atteindre une solution intérieure dans un délai plus ou moins long. En reprenant l'équation (15), on voit que la mise en œuvre d'une politique de recherche orientée vers le secteur propre va réduire  $\varphi_d(t)\sigma_d / \varphi_c(t)\sigma_c$ , de sorte que si  $\varphi_c(t) / \varphi_d(t)$  augmente assez vite, ce terme va "rattraper"  $X(t)$ . En d'autres termes, ici encore, plus la politique de recherche sera intense, plus la solution intérieure sera rapidement atteinte.

## Politiques économiques et paradoxe vert

Nous situons maintenant notre analyse après la date  $t_0$  à laquelle l'équilibre intérieur a été atteint. Par commodité, nous normalisons la date  $t_0$  à 0. Nous étudions ici les effets de la subvention à la R&D dédiée au secteur propre  $\varphi_c$  sur l'extraction de la ressource et les émissions de  $\text{CO}_2$  quand une taxe unitaire sur ces émissions est prélevée simultanément. Nous supposons également que les taux de croissance des subventions  $g_{\varphi_c}$  et  $g_{\varphi_d}$  sont égaux et constants. Enfin, nous nous focalisons ici sur le cas dans lequel les inputs agrégés propre et sale,  $Y_c$  et  $Y_d$ , sont de bons substituts, c'est-à-dire le cas où  $a > 0$ . Comme Acemoglu et al. (2012) le soulignent, ce cas apparaît comme le plus pertinent empiriquement.

Nous allons voir que l'impact des politiques de recherche sur le profil temporel d'utilisation de la ressource, et donc le profil des émissions polluantes, dépend de leur impact sur le prix initial de la ressource  $p_R(0)$ . Ainsi, pour comprendre les effets de ces politiques, nous allons décomposer le mécanisme en deux étapes : premièrement, l'impact de la subvention sur  $p_R(0)$ , puis l'impact d'une variation de ce prix sur le rythme d'extraction de la ressource<sup>3</sup>.

## Impact sur le prix initial de la ressource

Rappelons tout d'abord que  $\Phi(t) = X(t) + 1$ , où  $X(t)$  est donné par (14) ; donc,  $\Phi = \varphi_d(0)\sigma_d / \varphi_c(0)\sigma_c + 1$  est constant.

Afin d'exprimer le lien entre  $p_R(0)$  et  $\Phi$ , nous utilisons le fait que le stock initial de ressource  $S(0)$  est asymptotiquement épuisé :  $\int_0^{+\infty} R(t)dt = S(0)$ . Nous exprimons donc  $R(t)$  en fonction de  $p_R(0)$ . En utilisant l'équation (18) et  $\tau(t) / p_R(t) = \tau(0)e^{\alpha t} / p_R(0)$  (voir la section « Dynamique de l'utilisation de la ressource sale »), l'équation (20) s'écrit  $R(t) = (1 - \alpha)Y(0)e^{-\rho t} / [p_R(0) + h\tau(0)e^{\alpha t}] \Phi$ . Nous avons donc

$$(24) \quad \int_0^{+\infty} \frac{Y(0)}{\Phi} \frac{(1 - \alpha)e^{-\rho t}}{[p_R(0) + h\tau(0)e^{\alpha t}]} dt = S(0).$$

Ainsi, nous observons que si une politique économique donne lieu à une augmentation (respectivement, une diminution) de  $Y(0)/\Phi$ , alors  $p_R(0)$  augmente nécessairement (respectivement, diminue) afin que la condition (24) soit satisfaite.

Nous devons maintenant mesurer comment le niveau de  $\Phi$  affecte  $Y(0)/\Phi$ . En utilisant les équations (14) et (19), nous obtenons  $Y_c(t)^a / Y_d(t)^a = \Phi - 1$ , ce qui, avec l'équation (1) donne  $Y_c(t)^a = Y_d(t)^a (\Phi - 1)$  et  $Y(t)^a = Y_d(t)^a \Phi$ . Nous avons donc  $Y(t)^a = Y_c(t)^a [\Phi / (\Phi - 1)]$ . Dès lors,

<sup>3</sup> Dans cette section, nous n'explicitons que les résultats qui permettent de mesurer l'impact des politiques sur le rythme d'extraction de la ressource. Nous présentons dans l'Annexe 2 des résultats complémentaires sur l'équilibre intérieur.

en utilisant (2) ainsi que (9) et (14), nous pouvons écrire :

$$(25) \quad \frac{Y(0)}{\Phi} = \left[ \frac{(\alpha^2/\psi)^{\alpha/(1-\alpha)} Q A_c(0)}{\alpha \varphi_d(0) \sigma_d} \right] \left[ \frac{(\Phi-1)^{\alpha-1/a}}{\Phi^{1-1/a}} \right]^{\frac{1}{1-\alpha}}.$$

C'est cette expression qui va nous permettre d'étudier l'impact d'une politique de recherche sur le prix initial de la ressource sale.  $\partial(Y(0)/\Phi)/\partial\Phi$  est du même signe que  $(a-1)/a - (1-\alpha)\Phi$ . Nous supposons ici que  $(1-\alpha)\Phi < 1$ , ce qui est équivalent à  $\varphi_c(0)/\varphi_d(0) > (1-\alpha)\sigma_d/\alpha\sigma_c$ ; en d'autres termes, la subvention à la recherche dans le secteur propre doit être suffisamment forte par rapport à la subvention à la recherche sale. Puisque  $0 < a < 1$ , nous avons  $\partial(Y(0)/\Phi)/\partial\Phi < 0$ . Grâce à l'équation (24) nous en déduisons que plus  $\varphi_c(0)$  est élevé - et donc plus  $\Phi$  est faible - plus  $p_R(0)$  est élevé.

**Lemme 1 :** *Dans un équilibre intérieur, plus la subvention à la recherche dédiée au secteur propre  $\varphi_c$  est importante, plus le prix initial de la ressource  $p_R(0)$  est élevé.*

Nous revenons sur les intuitions qui sous-tendent ce résultat dans les commentaires de la Proposition ci-dessous (section « Synthèse et commentaires »).

## Impact sur le rythme d'extraction de la ressource

$\Phi$  étant constant, l'équation (23) donne  $g_R(t) = -\rho - \frac{\delta}{[p_R(0)e^{-\delta(t)/h\tau(0)}]^{1-\alpha}}$ . Nous observons donc que l'impact d'une modification du prix initial de la ressource sur son rythme d'extraction dépend du profil temporel de la taxe carbone qui a été mise en œuvre. Les résultats sont présentés dans le lemme ci-dessous.

**Lemme 2 :** *Dans un équilibre intérieur, plus le prix initial de la ressource  $p_R(0)$  est élevé, plus l'extraction de la ressource est rapide (donc plus  $g_R(t)$  est faible) si et seulement si l'effet isolé de la taxe carbone est de ralentir cette extraction ( $\delta < 0$ ). En l'absence de taxe carbone, ou si la taxe carbone est neutre ( $\delta = 0$ ), alors  $p_R(0)$  n'a pas d'impact sur le rythme d'extraction de la ressource.*

Nous revenons également sur ces résultats dans les commentaires de la Proposition ci-dessous (section « Synthèse et commentaires ») où nous montrons que c'est une modification du profil temporel du prix final de la ressource qui génère la modification du profil d'extraction.

Ayant déterminé comment le niveau de  $\varphi_c(0)$  affecte  $p_R(0)$  dans la section précédente, nous pouvons désormais caractériser son impact sur le taux de croissance de l'extraction de la ressource et donc le profil temporel des émissions polluantes. Si la taxe carbone déjà mise en place a pour effet une accélération de l'extraction de la ressource (c'est-à-dire, si  $\delta > 0$ ), alors plus la subvention est élevée, plus  $g_R(t)$  l'est : l'accélération de l'extraction de la ressource est

freinée par la subvention. Inversement, si la taxe carbone conduit à un ralentissement de l'extraction ( $\delta < 0$ ), alors une politique de R & D orientée vers le secteur propre agit là encore à l'opposé de ce premier effet en diminuant  $g_R(t)$ . Cette politique génère un paradoxe vert ; en effet, elle conduit à une augmentation des émissions polluantes à court-terme.

## Synthèse et commentaires

Les principaux effets de la politique de recherche orientée vers le secteur propre sont résumés dans la proposition suivante.

**Proposition :** *Dans un équilibre intérieur, la subvention à la recherche dédiée au secteur propre atténue les effets de la taxe carbone : si la taxe carbone crée un paradoxe vert, la subvention diminue cet effet ; inversement, si la taxe carbone retarde l'extraction, la subvention génère une forme de paradoxe vert.*

Nous présentons maintenant les principales intuitions qui sous-tendent le résultat présenté dans cette proposition. Nous décomposons le canal de transmission des effets de la politique économique en trois mécanismes élémentaires.

**Impact de la subvention sur l'utilisation des biens intermédiaires :** L'équation (14) montre que plus la subvention à la recherche dédiée au secteur propre  $\varphi_c(t)$  est élevée, plus l'utilisation relative du bien intermédiaire sale ( $x_d(t)/x_c(t)$ ) l'est également. Ce résultat peut paraître paradoxal. Pour le comprendre, rappelons que cette équation est une condition de non-arbitrage qui régit l'activité globale de R&D en égalisant la productivité marginale du travail dans les deux secteurs. Or, plus la subvention est élevée, plus les profits dans le secteur de la R&D dans le secteur propre le sont. Puisque les profits dans la production de biens intermédiaires sont linéaires (équation 12), les équations (13) et (11) montrent que les profits dans la R&D sont également linéaires en  $x_j(t)$ . Dès lors, le niveau plus élevé de  $\varphi_c(t)$  est compensée par un réajustement de la production des deux types de biens intermédiaires au profit du secteur sale, c'est-à-dire un niveau supérieur de  $x_d(t)/x_c(t)$ . Ici, donc, une promotion accrue de la recherche dans le secteur propre par le biais d'une plus forte subvention aux profits des innovateurs dans ce secteur conduit à un rééquilibrage des deux secteurs de R&D qui résulte en une utilisation relativement plus forte des biens intermédiaires sales.

**Bien intermédiaires, productivité de la ressource et prix initial :** Le rapport des productions de biens intermédiaires  $x_d(t)/x_c(t)$  étant plus élevé, l'équation (19) montre que le ratio  $(Y_c(t)/Y_d(t))^a$  est plus faible. Dès lors, la productivité marginale de la ressource donnée par l'équation (4) est supérieure à toute date  $t$ . L'intuition qui sous-tend ce résultat est la suivante. Nous venons de voir qu'une subvention à la recherche dédiée au secteur propre plus élevée favorise paradoxalement la production relative de bien intermédiaire sale. Dès lors, par effet de complémentarité dans la production de l'input sale  $Y_d$ , la demande de ressource est également plus importante. Puisque la demande de ressource est plus forte à la date 0, il en va de même de

son prix initial :  $p_R(0)$  augmente (voir le Lemme 1).

**Prix initial, profil temporel du prix de la ressource et rythme d'extraction :** Le Lemme 2 caractérise l'impact d'un prix initial de la ressource plus élevé sur le profil temporel de son utilisation ainsi que des émissions polluantes. Pour comprendre ce résultat, il faut revenir à l'effet d'un niveau plus élevé de  $p_R(0)$ , c'est-à-dire le prix producteur initial, sur la dynamique du prix global de la ressource  $p_R^*(t)$ . Rappelons ici que  $p_R^*(t) = p_R(t) + h\tau(t)$  ; en différenciant cette expression, on obtient  $\dot{p}_R^*(t)/p_R^*(t) = r(t) + \delta/[p_R(0)e^{-\delta t}/h\tau(0) + 1]$  (voir les équations (21) et (23)). Nous observons donc que l'impact de  $p_R(0)$  sur le taux de croissance du prix global de la ressource dépend du signe de  $\delta$ , c'est-à-dire de la nature de la taxe carbone. Si la taxe carbone accélère l'extraction de la ressource ( $\delta > 0$ ), alors un  $p_R(0)$  plus élevé conduit à une croissance plus faible du prix global de la ressource :  $\dot{p}_R^*(t)/p_R^*(t)$  est plus faible. Dans ce cas, l'extraction de la ressource est ralentie, et, en particulier, les niveaux d'extraction et de pollution initiaux sont plus faibles.

A l'inverse, dans le cas plus réaliste d'une taxe ralentissant l'extraction de la ressource ( $\delta < 0$ ), un niveau plus élevé du prix producteur initial de la ressource renforce la croissance de son prix global, si bien que l'extraction de cette ressource est accélérée, et ses niveaux d'extraction initiaux sont plus forts.

On voit bien ici que, dans tous les cas, l'effet de la subvention à la recherche dédiée au secteur propre va à l'encontre de l'effet de la taxe carbone qui lui est associée.

## Discussion

Nous avons étudié, dans le cadre d'un modèle théorique, les effets croisés d'un dispositif de subventions à la R&D et d'une taxe carbone, notamment dans leurs impacts en termes de paradoxe vert. Nous évoquons ici l'existence d'instruments de politique économique se rapprochant de ceux décrits dans notre modèle et nous discutons leurs implications potentielles à la lumière de nos résultats théoriques.

Les politiques économiques de lutte contre les émissions de carbone qui sont mises en œuvre ou envisagées par de nombreux gouvernements dans le monde aujourd'hui comprennent des outils divers. Elles peuvent néanmoins être classées de façon élémentaire en systèmes de quotas échangeables (cap and trade), taxes ou standards de performance. L'application de ces instruments - ou les discussions à ce sujet - ne concerne à ce jour que quelques régions du monde. Des politiques sont déjà appliquées en Europe et en Nouvelle Zélande, et, plus récemment, en Australie et aux Etats-Unis (dans l'Etat de la Californie, et dans un groupement d'Etats du Nord-Est du pays). Par ailleurs, il existe des projets de politiques similaires en Chine, Corée du Sud, en

Afrique du Sud, au Mexique et au Kazakhstan<sup>4</sup>. Nous sommes donc à ce jour assez éloignés de la mise en œuvre d'un instrument de contrôle des émissions de carbone à l'échelle mondiale.

Outre l'absence d'une telle régulation globale, on observe au contraire, à une assez vaste échelle, l'existence de politiques incitant à des activités émettrices de carbone. Celles-ci prennent la forme d'un large éventail de subventions, souvent importantes, à la consommation et à la production d'énergies fossiles dans de nombreux pays. Des études récentes estiment qu'entre 400<sup>5</sup> et 750<sup>6</sup> milliards de dollars de fonds publics sont dépensés chaque année afin de soutenir la consommation et la production de ces énergies<sup>7</sup> dans des pays développés ou en développement – parmi lesquelles 80% sont des subventions à la consommation dans des pays en développement. Bien entendu, certaines régions développées, comme l'Union Européenne, ne subventionnent pas mais, au contraire, taxent la demande d'énergies fossiles. Cependant, les subventions proviennent majoritairement de régions en développement, qui sont la source principale de la croissance de la demande<sup>8</sup> d'énergies fossiles, et donc des émissions de carbone. Dès lors, éliminer ou réduire ces subventions créerait des incitations à réduire la demande de ces énergies et donc les émissions de carbone à grande échelle. Dans le contexte de notre analyse et, comme nous le verrons ci-dessous, parce que il s'agit d'un mouvement international, les initiatives visant à réduire ces subventions peuvent être rapprochées de l'introduction d'une taxe carbone mondiale. Ces subventions reviennent en effet à des taxes négatives ; ainsi, une réduction des subventions aux ressources fossiles non-renouvelables peut être interprétée comme la mise en œuvre, ou encore l'augmentation, d'une taxe carbone.

A ce jour, on observe des pressions politiques importantes pour réduire ces subventions, qui ont conduit à des promesses de la part de certains gouvernements. Suite au Sommet du G20 à Pittsburg en 2009 et celui de l'APEC, 53 pays se sont engagés à une diminution puis une annulation à moyen-terme des subventions encourageant des activités émettrices en carbone. Plus récemment, la question de la réforme des subventions aux énergies fossiles a été discutée au Sommet Rio+20 sur la soutenabilité. Dans le compte-rendu de cette rencontre<sup>9</sup>, plusieurs pays ont réaffirmé leur engagement à mettre un terme à ces mesures et en ont invité d'autres à joindre leur effort en réduisant les leurs.

Parallèlement à l'émergence de systèmes cap and trade et à ce mouvement vers une disparition des politiques de subvention aux énergies polluantes, de nombreux pays dans le monde ont développé, de façon autonome ou en coordination avec des organisations internationales comme

---

<sup>4</sup> World Bank. *State and Trends of the Carbon Market 2012*.

[http://siteresources.worldbank.org/INTCARBONFINANCE/Resources/State\\_and\\_Trends\\_2012\\_Web\\_Optimized\\_19035\\_Cvr&Txt\\_LR.pdf](http://siteresources.worldbank.org/INTCARBONFINANCE/Resources/State_and_Trends_2012_Web_Optimized_19035_Cvr&Txt_LR.pdf)

<sup>5</sup> IEA. *Analysis of fossil fuel subsidies*. 2011.

[http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/energysubsidies/ff\\_subsidies\\_slides.pdf](http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/energysubsidies/ff_subsidies_slides.pdf)

<sup>6</sup> Natural Resources Defence Council, *Fuel Facts*, June 2012. <http://www.nrdc.org/energy/files/fossilfuel4.pdf>

<sup>7</sup> <http://www.nrdc.org/energy/files/fossilfuel4.pdf>

<sup>8</sup> IEA. *World Energy Outlook – executive summary*. 2011.

[http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2011/executive\\_summary.pdf](http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2011/executive_summary.pdf)

<sup>9</sup> See pg. 42, paragraph 225. <http://www.uncsd2012.org/rio20/thefuturewewant.html>

l'Agence Internationale de l'Energie (AIE)<sup>10</sup>, des projets divers de R&D autour de l'amélioration de l'efficacité énergétique et de la décarbonisation de l'énergie, c'est-à-dire l'amélioration des technologies, qu'elles soient sales ou propres.

Concernant l'efficacité énergétique, il existe des nombreux programmes de R&D visant à réduire les pertes d'énergie ainsi que l'amélioration de l'efficacité dans la consommation. La base de données de l'AIE<sup>11</sup> montre un grand nombre de programmes de R&D portant sur des technologies tels que les réseaux électriques intelligents, les moteurs à combustion interne, les bâtiments 'verts', ou encore la récupération de l'énergie dissipée. Parallèlement, certaines initiatives cherchent à promouvoir l'efficacité des énergies fossiles<sup>12</sup>, avec notamment des accords de recherche sur les technologies du charbon (e.g. le Centre AIE pour le charbon propre), la récupération assistée du pétrole (Enhanced Oil Recovery), ou encore les GES issus des combustibles fossiles.

D'autres programmes sont concentrés sur les énergies propres<sup>13</sup>. Ceux-ci englobent des projets de recherche sur l'hydrogène, la bioénergie, les énergies géothermique, marine, photovoltaïque, solaire, éolienne ou hydraulique, ainsi que leur déploiement. On peut noter que la plupart des projets de recherche initiés par l'AIE dans ce domaine sont développés au sein de pays membres de cette organisation, qui sont principalement des pays développés, ou en développement avancé. Néanmoins, de grands pays en développement, comme la Chine, l'Inde ou le Brésil, ont également développé des programmes de R&D dans les énergies propres. Les Etats-Unis et la Chine, par exemple, ont créé le Clean Energy Research Centre<sup>14</sup>, et une initiative similaire est en cours avec l'Inde<sup>15</sup>.

Etant donnée la nature des programmes de recherche sur les énergies propres, qui sont généralement concentrés sur une seule énergie, ou une gamme d'énergies assez proches, il peut paraître difficile de les assimiler à une subvention globale à la R&D verte. Néanmoins, même si nous nous en tenons à des incitations spécifiques comme, par exemple, le solaire photovoltaïque, nous pouvons observer qu'elles sont nombreuses et assez largement réparties, que ce soit dans les pays de l'OCDE membres de l'AIE, ou dans les programmes de R&D bilatéraux comme il y en a avec des pays gros émetteurs tels que la Chine ou l'Inde. Nous devons reconnaître cependant que ces mesures sont, à ce jour, appliquées moins globalement que les diminutions des subventions mentionnées plus haut dans cette section. De plus, comme le montre la base de données de l'AIE, les politiques visant à stimuler l'efficacité énergétique et les politiques de R&D dédiées aux technologies sales sont plus répandues que les politiques de R&D « verte ». De plus, elles sont réparties de façon bien plus homogène au sein des pays industrialisés et des économies émergentes.

Nous venons de voir qu'il existe des exemples concrets de politiques qui peuvent, dans une

---

<sup>10</sup> IEA. *Multilateral Technology Initiatives*. <http://www.iea.org/techno/index.asp>

<sup>11</sup> IEA. *Policies and Measures Database*. <http://www.iea.org/policiesandmeasures/energyefficiency/>

<sup>12</sup> IEA. *Technology Agreements – Fossil Fuels*. <http://www.iea.org/techno/technologies/fossil.asp>

<sup>13</sup> IEA. *Technology Agreements – Renewable Energy*. <http://www.iea.org/techno/technologies/renew.asp>

<sup>14</sup> CERC. <http://www.us-china-cerc.org/index.html>

<sup>15</sup> JCERDC. <http://www.indousstf.org/JCERDC.html>

certaines mesures, être rapprochées des politiques que nous avons étudiées dans notre modèle, c'est-à-dire, une taxe carbone globale et des subventions à la R&D « verte » et à la R&D « sale ». Notre étude nous a notamment permis de déterminer dans quelle mesure l'association de telles politiques pouvait donner lieu à un paradoxe vert. A ce jour, les principales mesures permettant de réduire les subventions aux énergies fossiles restent à venir. Parallèlement, si nous observons que les politiques de R&D dédiées aux technologies sales sont largement répandues, le panorama des projets de R&D « verte » reste assez atomisé. Ces éléments tendent à nous faire penser que la possibilité d'une analyse empirique sur ce sujet serait rendue difficile par la complexité du cadre réglementaire actuel.

Il paraît dès lors difficile de présenter à ce stade des recommandations immédiates et concrètes sur la base de nos résultats théoriques. Néanmoins, les politiques climatiques se développant, nous espérons que des données sur les subventions aux énergies fossiles, les incitations à la R&D verte, ou le rythme d'utilisation des différentes énergies, nous permettront de tester nos résultats.

## Conclusion

Nous avons considéré une économie dans laquelle un bien final est produit grâce à une technologie utilisant deux secteurs. Chacun de ces secteurs utilise une ressource naturelle ainsi que de la connaissance et des biens intermédiaires spécifiques. L'une de ces ressources est non-renouvelable et polluante, l'autre est renouvelable et propre. Les pouvoirs publics mènent conjointement deux politiques climatiques. Ils imposent une taxe sur les émissions de carbone et subventionnent les deux secteurs de recherche.

Nous avons étudié l'impact simultané de ces deux politiques sur le rythme d'extraction de la ressource polluante et les émissions de carbone. Nous montrons que selon le type de taxe carbone mise en œuvre, l'impact des subventions à la recherche dédiée au secteur propre varie. Plus précisément, la subvention a des effets sur l'extraction et les émissions de carbone opposés à ceux de la taxe. Quand la taxe crée un paradoxe vert, la subvention le réduit, et quand la taxe ralentit l'extraction, la subvention génère un paradoxe vert.

Cet article montre, dans le cas de deux politiques climatiques spécifiques, que les interactions entre différents outils d'intervention peuvent être complexes et qu'elles doivent donc être prises en compte par les décideurs. De façon plus générale, l'analyse des effets joints et des éventuelles complémentarités entre ces outils dans le cadre de la lutte contre le changement climatique nous semble être un thème important, qui pourra faire l'objet d'études ultérieures.

# Annexe 1 : Occurrence d'un équilibre intérieur

Nous avons montré dans la section « Secteur des biens intermédiaires » que  $x_{ji}(t) = x_j(t)$ . Pour cette raison, l'équation (2) peut être réécrite ainsi :  $Y_c(t) = Q^{1-\alpha} A_c(t)^{1-\alpha} x_c(t)^\alpha$ . Différenciée par rapport au temps, cette équation donne  $g_{Y_c}(t) = (1-\alpha)g_{A_c}(t) + \alpha g_{x_c}(t)$ . De la même façon, l'équation (3) s'écrit  $Y_d(t) = R(t)^{1-\alpha} A_d(t)^{1-\alpha} x_d(t)^\alpha$ , ce qui donne  $g_{Y_d}(t) = (1-\alpha)g_R(t) + (1-\alpha)g_{A_d}(t) + \alpha g_{x_d}(t)$ . Nous en déduisons  $g_{Y_c}(t) - g_{Y_d}(t) = (1-\alpha)[g_{A_c}(t) - g_{A_d}(t)] + \alpha[g_{x_c}(t) - g_{x_d}(t)] - (1-\alpha)g_R(t)$ . Nous pouvons remplacer  $g_{Y_c}(t) - g_{Y_d}(t)$  par  $[g_{x_c}(t) - g_{x_d}(t)]/a$  grâce à l'équation (19) et  $g_{x_c}(t) - g_{x_d}(t)$  par  $g_X(t)$ . En remplaçant  $g_R(t)$  par son expression dans (23) et en remplaçant  $g_\Phi(t)$  par son expression tirée de (22), on obtient :

$$(26) \quad g_X(t) = \frac{(1-\alpha)}{\left[\frac{1-\alpha+X(t)}{a} \frac{1}{1+X(t)}\right]} \left[ \rho + \frac{\delta}{[p_R(0)e^{-\delta}/h\tau(0)]+1} + [g_{A_c}(t) - g_{A_d}(t)] \right].$$

Supposons que nous soyons initialement dans une solution en coin telle que  $L_c = 0$  et  $L_d = 1$ , c'est-à-dire,  $X(0) < \sigma_d \varphi_d(0) / \sigma_c \varphi_c(0)$  (voir l'équation (15)). Dans ce cas,  $g_{A_c}(t) = 0$  et  $g_{A_d}(t) = \gamma \sigma_d$  (voir l'équation (1)). Dès lors, l'équation (26) peut être réécrite ainsi :  $g_X(t) = \frac{(1-\alpha)}{\left[\frac{1-\alpha+X(t)}{a} \frac{1}{1+X(t)}\right]} \left[ \rho - \gamma \sigma_d + \frac{\delta}{[p_R(0)e^{-\delta}/h\tau(0)]+1} \right]$ . Notons ici  $u$  le premier terme de ce produit,  $\frac{(1-\alpha)}{\left[\frac{1-\alpha+X(t)}{a} \frac{1}{1+X(t)}\right]} \equiv u$ , et  $v$  le second,  $\left[ \rho - \gamma \sigma_d + \frac{\delta}{[p_R(0)e^{-\delta}/h\tau(0)]+1} \right] \equiv v$ . Nous pouvons supposer que  $v$  est négatif. D'une part, il est en effet standard de considérer que  $\gamma \sigma_d$ , c'est-à-dire un produit de paramètres caractérisant le secteur de la R&D, est supérieur au taux d'escompte psychologique,  $\rho$ . De plus, le signe du troisième élément contenu dans  $v$ ,  $\frac{\delta}{[p_R(0)e^{-\delta}/h\tau(0)]+1}$ , dépend du signe de  $\delta$ . Si  $\delta$  est positif, ce ratio est positif ; mais il est borné supérieurement par  $\delta$ . Dès lors,  $v$  est négatif si  $\gamma \sigma_d \geq \rho + \delta$ , c'est-à-dire si la taxe carbone ne croît pas trop vite, ou, en d'autres termes, si elle ne conduit pas à une accélération trop forte de l'extraction de la ressource. Si  $\delta$  est négatif, le ratio  $\frac{\delta}{[p_R(0)e^{-\delta}/h\tau(0)]+1}$  est négatif et donc  $v$  l'est également sans ambiguïté.

On montre aisément que  $u$  est du signe de  $a$ . Donc, le signe de  $g_X(t)$  est l'opposé de celui de  $a$ .

## Annexe 2 : Equilibre intérieur et impact des politiques

Puisque  $g_{\varphi_c}$  et  $g_{\varphi_d}$  sont égaux et constants, l'équation (14) donne

$$\frac{x_c(t)}{x_d(t)} = \frac{\varphi_d(0)e^{g_{\varphi d}t}\sigma_d}{\varphi_c(0)e^{g_{\varphi c}t}\sigma_c} = \frac{\varphi_d(0)\sigma_d}{\varphi_c(0)\sigma_c} = \text{constante.}$$

De ce fait, le taux de croissance de  $X(t)$  est nul à toute date. En utilisant l'équation (10), on a  $g_{A_j}(t) = \gamma\sigma_j L_j(t)$ ,  $\forall j = c, d$ . Puisque  $1 = L_c(t) + L_d(t)$ ,

$$\text{l'équation (26) donne } L_j(t) = \frac{\gamma\sigma_j - \rho - \frac{\delta}{[p_R(0)e^{-\delta t/h\tau(0)}]^{+1}}}{\gamma\sigma_c + \gamma\sigma_d}, \forall j = c, d.$$

Avec l'équation (23), cette égalité implique :  $L_c(t) = \frac{\gamma\sigma_d + g_R(t)}{\gamma\sigma_c + \gamma\sigma_d}$ , et  $L_d(t) = \frac{\gamma\sigma_c - g_R(t)}{\gamma\sigma_c + \gamma\sigma_d}$ . Dès lors,  $L_c(t)$  décroît avec le

temps et tend asymptotiquement vers  $\frac{\gamma\sigma_d - \rho}{\gamma\sigma_c + \gamma\sigma_d} > 0$ , et  $L_d(t)$  croît avec le temps et tend

asymptotiquement vers  $\frac{\gamma\sigma_c + \rho}{\gamma\sigma_c + \gamma\sigma_d}$ .

Nous pouvons ainsi voir comment le niveau de  $\varphi_c(0)$ , et donc de  $\varphi_c(t)$ , affecte les efforts dans la recherche. Si  $\delta < 0$ , ce qui signifie que la taxe carbone diminue  $g_R(t)$ , c'est-à-dire qu'elle retarde l'extraction de la ressource, alors plus  $\varphi_c(t)$  est élevé, plus  $L_c(t)$  est faible, et plus  $L_d(t)$  est élevé, à toute date  $t$ . Inversement, si  $\delta > 0$ , alors plus  $\varphi_c(t)$  est élevé, plus  $L_c(t)$  est élevé, et plus  $L_d(t)$  est faible, à toute date  $t$ .

# Références

- Acemoglu, D. (2002), "Directed Technical Change", *Review of Economic Studies*, 69: 781-809.
- Acemoglu, D. (2009), "Introduction to Modern Economic Growth", Princeton University Press.
- Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztyn et D. Hemous (2012), "The Environment and Directed Technical Change", *American Economic Review*, 102(1): 131-66.
- Aghion, P., et P.W. Howitt (1992), "A Model of Growth Through Creative Destruction", *Econometrica*, 60(2): 323-351.
- Aghion, P., et P.W. Howitt (1998), "Endogenous Growth Theory", MIT Press, Cambridge.
- Barro, R.J., and X. Sala-i-Martin (2004), *Economic Growth*, MIT Press, Cambridge.
- Cozzi, G., P.E. Giordani et L. Zamparelli (2007), "The Refoundation of the Symmetric Equilibrium in Schumpeterian Growth Models", *Journal of Economic Theory*, 136: 788-797.
- Dasgupta, P.S., G.M. Heal et J.E. Stiglitz (1981), "The Taxation of Exhaustible Resources", NBER Working Papers #436, Cambridge.
- Daubanes, J., A. Grimaud et L. Rouge (2012), "Green Paradox and Directed Technical Change: The Effects of Subsidies to Clean R&D", IDEI Working Paper 743.
- Gerlagh, R. (2011), "Too Much Oil", *CESifo Economic Studies*, 57(1): 79-102.
- Grafton, R.Q., T. Kompas et N.V. Long (2010), "Biofuels Subsidies and the Green Paradox", CESifo Working Papers 2960.
- Hoel, M. (2010), "Is There a Green Paradox?", CESifo Working Papers 3168.
- Sinn, H.-W. (2008), "Public Policies Against Global Warming: A Supply Side Approach", *International Tax and Public Finance*, 15: 360-394.
- van der Ploeg, F., et C. Withagen (2012), "Is There Really a Green Paradox?", *Journal of Environmental Economics and Management*, forthcoming.
- van der Werf, E., et C. Di Maria (2012), "Imperfect Environmental Policy and Polluting Emissions: The Green Paradox and Beyond", *International Review of Environmental and Resource Economics*, 6:153-194.
- Withagen, C.A. (1994), "Pollution and Exhaustibility of Fossil Fuels", *Resource and Energy*

*Economics*, 16: 235-242.