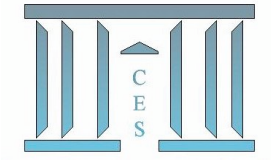
Documents de Travail du
Centre d'Economie de la Sorbonne

CES Working Papers



Recyclage et externalités environnementales : Faut-il subventionner les activités de récupération recyclage ?

Jean De BEIR, Mouez FODHA, Guillaume GIRMENS

2007.10

CENTRE NATIONAL
DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Maison des Sciences Économiques, 106-112 boulevard de L'Hôpital, 75647 Paris Cedex 13
http://ces.univ-paris1.fr/CESPublicat.htm
ISSN en cours d'attribution

Recyclage et externalités environnementales : Faut-il subventionner les activités de récupération recyclage ?

Jean De Beir[1], Mouez Fodha[2], Guillaume Girmens[3]

mars 2007

[1]EPEE, Université d'Evry-Val-d'Essonne. Bd. F. Mitterrand, 91025 Evry Cedex. *E-mail* : jean.debeir@univ-evry.fr. *Tel.* : +33 (1) 69 47 70 60.

[2]CES, Université Paris 1. Maison des Sciences Economiques, 106-112 Bld de l'Hôpital, 75013 Paris Cedex. *Tel.* : +33 (0) 1 44 07 82 21. *E-mail* : fodha@univ-paris1.fr.

[3]EPEE, Université d'Evry-Val-d'Essonne. Bd. F. Mitterrand, 91025 Evry Cedex. *E-mail* : ggirmens@univ-evry.fr.

Résumé

Cet article analyse l'activité de recyclage dans un cadre d'équilibre général. Nous montrons que l'Etat doit subventionner les récupérateurs recycleurs si ceux-ci supportent des coûts trop élevés, afin de les inciter à récupérer et recycler tout le gisement disponible de déchets. En revanche, cette incitation fiscale doit disparaître si leur activité est profitable. La structure optimale de la fiscalité peut même conduire le régulateur à taxer les firmes de récupération recyclage. Nous montrons enfin que si l'activité de recyclage est suffisamment efficace, elle permet d'internaliser les externalités environnementales. Dans ce cas, la récupération recyclage devient un vecteur du développement durable.

Mots-clés : modèle à générations imbriquées, secteur du recyclage, externalités environnementales, politique fiscale.

Recycling and Environmental Externalities : Should Recycling Be Subsidized ?

Abstract : *This paper considers recycling in a general equilibrium model. It is shown that recycling should be subsidized if recycling costs are high, as an incentive to recycle all of the available waste. This tax incentive should vanish if recycling is profitable enough. In this case, recycling should even be taxed, in order to make the competitive equilibrium be an optimal allocation. We conclude also that, if recycling is efficient enough, it allows to internalize environmental externalities. In this case, recycling replaces a tax instrument.*

Keywords : overlapping generations model, recycling sector, environmental externalities, tax policy.

Classification JEL : D62, H23, Q53

1 Introduction

Le recyclage des résidus est une activité qui s'inscrit dans la perspective du développement durable. A côté de préoccupations environnementales, il correspond à une réalité industrielle et à des contraintes technologiques. Par exemple, en France, l'industrie papetière utilise, en proportion de ses inputs, plus de 58% de papiers et cartons récupérés. Le taux de récupération[1] s'élève à plus de 54%.[2] C'est une activité qui gagne du terrain pour de nombreux matériaux. A titre d'exemple, certains pays d'Europe atteignent des taux de recyclage du verre record (96% en Suisse, 92% en Suède, 88% en Allemagne et en Belgique, seulement 58% en France en 2003).[3]

Le secteur du recyclage a trois caractéristiques fondamentales. (*i*) D'une part, il permet la réduction d'externalités environnementales négatives. (*ii*) D'autre part les facteurs de production utilisés sont contraints par la production des périodes précédentes. (*iii*) Enfin ces facteurs sont des déchets dont le mode de fixation des prix peut ne pas être concurrentiel.[4]

La littérature économique analyse le recyclage à travers trois prismes théoriques. Le recyclage est intégré dans l'analyse de l'organisation industrielle ; suite à l'affaire Alcoa en 1945, des travaux mesurent l'érosion possible d'un pouvoir de monopole par l'activité d'une concurrence exercée par des producteurs de bien recyclé. Ils montrent que le contrôle par Alcoa de la production d'aluminium primaire lui permet de conserver son pouvoir de marché face à une frange concurrentielle de recycleurs. En effet, la croissance du marché de l'aluminium a favorisé le monopole et ce dernier, en contrôlant la ressource primaire, maintient sa rente (Gaskins (1974), Swan (1980)) ; par ailleurs, dans le contexte de l'entre-deux guerres, il existe des difficultés techniques dans la récupération et le recyclage de l'aluminium qui freinent la production secondaire et réduisent la substituabilité des matériaux vierges et recyclés (Suslow (1986) , Grant (1999))[5]. Ensuite, l'économie des ressources naturelles permet de comprendre l'intérêt du recyclage quant à la disponibilité d'une ressource dans le futur ; le recyclage retarde l'épuisement de la ressource minière et réduit l'intensité de l'exploi-

[1] Il s'agit du rapport entre la récupération des papiers-cartons usagés et la consommation de papiers-cartons neufs.

[2] Confédération Française de l'Industrie des Papiers, Cartons et Celluloses, 2003.

[3] Fédération Européenne du Verre d'Emballage, 2003.

[4] Cette caractéristique est une conséquence de la définition juridique du déchet. Selon la loi, un déchet correspond à "tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit (...) abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon". C'est donc tout bien inutile pour son détenteur, ce qui lui confère ainsi une valeur nulle ou négative. Mais la notion de déchet ne peut être précise puisqu'elle dépend des technologies disponibles et de la structure de l'économie : le développement des secteurs de la récupération recyclage transforme le déchet en matière première.

[5] Martin (1982) mène une analyse approfondie du maintien de la rente selon les différentes formes d'intégration verticale du marché entre Alcoa, des récupérateurs et des recycleurs.

tation de la ressource forestière (Mäler (1974), Dasgupta et Heal (1979)). Enfin, l'économie de l'environnement analyse le recyclage comme un frein à l'apparition d'externalités négatives ; c'est à partir de la problématique des déchets ménagers que la question du recyclage est introduite dans ces travaux (Lusky (1976)). La récupération et le recyclage apparaissent bien comme un mode de traitement des résidus complémentaire à d'autres filières d'élimination (Keeler et Renkow (1994)). Des recherches élargies aux pollutions industrielles et aux résidus de consommation sont réalisées par Palmer et Walls (1997) dans le cadre d'un équilibre partiel. Fullerton et Wu (1998) présentent un modèle d'équilibre général dans lequel des producteurs offrent un bien à partir d'inputs primaires et recyclés en choisissant leur taux d'emballage et leur recyclabilité. Le taux de déchets influe sur le bien-être des consommateurs et ces études montrent qu'il est possible de jouer sur une tarification incitative amont ou aval (Fullerton et Kinnaman (1995), Choe et Fraser (1999)). Ces modèles d'équilibre général ou partiel analysent des instruments financiers, plus rarement réglementaires, visant la réduction des externalités négatives provenant de l'élimination des déchets ménagers, des comportements illicites des ménages en matière de déchets et la rémunération de l'effort de tri des ménages.

L'examen de cette littérature montre que ces travaux n'envisagent pas les trois caractéristiques importantes du secteur simultanément, malgré les différents régimes de déséquilibre que peut engendrer la fixité du prix des déchets. Cet article prend en compte les trois caractéristiques du secteur du recyclage dans un cadre d'équilibre général. Plus précisément, nous envisageons le recyclage comme un moyen de réduire une externalité négative liée à une production industrielle (i) ; la quantité d'*inputs* récupérée par ce secteur est au maximum égale à la quantité de biens vierges produite à la période précédente (ii) ; il existe trois modes de détermination du prix des déchets : concurrence, négocié ou gratuité (iii).

Le cadre retenu est un modèle à générations imbriquées à la *Diamond* (1965). En effet, l'horizon temporel des problèmes environnementaux est le long terme alors que les solutions sont à mettre en œuvre dans le court terme. Ainsi, les coûts des mesures environnementales sont supportés par ceux qui en prendront l'initiative alors que les bénéfices seront dans le futur lointain. Ce cadre permet l'analyse théorique du principe de Développement Durable[6] et a guidé divers travaux portant sur les externalités environnementales intergénérationnelles, depuis notamment les travaux de Solow (1986) portant sur la gestion des ressources épuisables et John et Pecchenino (1994) portant sur les conséquences de la croissance sur la pollution. Ces travaux démontrent que la prise en compte de générations égoïstes qui

[6] Selon le rapport Bruntland (WCED (1997)), le dévelopement durable est celui qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs.

ne se rencontrent pas accroît l'amplitude des externalités intertemporelles et rend la tâche du planificateur plus complexe, nécessitant des instruments économiques supplémentaires. Notre point de vue est de considérer que le développement des secteurs de la récupération recyclage peut être un des outils d'internalisation des externalités intergénérationnelles.

Nous montrons en particulier que l'Etat doit mettre en œuvre une subvention au récupérateur recycleur si celui-ci ne demande pas la totalité disponible de matériau usagé. Inversement, on peut envisager une taxe sur le recyclage si les coûts liés à l'activité de recyclage ou le prix de mise à disposition des déchets sont faibles et ne reflètent pas la réalité de la disponibilité de la ressource récupérable.

Empiriquement, les incitations publiques au tri ont réduit le coût marginal de récupération sur l'ensemble des matériaux. La transposition dans les droits nationaux de la Directive Européenne de 2003 sur les déchets d'équipements électriques et électroniques renforce les aides visant la récupération et le recyclage des divers matériaux composants ces biens arrivés en fin de vie[7]. Cependant elles ne suffisent pas toujours, selon les pays et matériaux, à élever sensiblement les taux de recyclage. Notre modèle suggère qu'il faudrait augmenter l'aide publique au recyclage de ces matériaux (pour diminuer le coût de récupération recyclage), alors que ces aides ne sont pas nécessaires dans les secteurs où la récupération recyclage est profitable.

Cet article est organisé de la manière suivante. Une première section caractérise l'équilibre concurrentiel. Une deuxième section décrit l'optimum social. Une troisième section présente le niveau optimal des taux de taxes permettant de décentraliser l'optimum. La dernière section apporte des éléments de conclusion.

2 L'économie concurrentielle

Cette section présente le comportement des ménages, la production de bien vierge, de bien recyclé, l'évolution de la qualité de l'environnement, la contrainte budgétaire de l'Etat et enfin l'équilibre concurrentiel. Le cadre retenu est un modèle à générations imbriquées à la Diamond (1965), ce qui permet de prendre en compte simultanément le cycle de vie des agents et des biens.

[7] En France, c'est un Décret de juillet 2005 sur l'élimination des déchets issus des équipements électriques et électroniques qui permet l'application de la Directive de 2003. Dès novembre 2006, les producteurs de ces biens versent une contribution auprès de l'un des quatre éco-organismes agréés par l'Etat (Eco-Systèmes, ERP, Ecologic et Recyclum) ; c'est le consommateur final qui alimente cette contribution par le paiement d'une redevance payée à l'occasion de l'achat des biens concernés. Cette Eco-participation est censée combler l'écart entre le prix de revente des matériaux secondaires et le coût marginal de leur récupération. Ce système s'inscrit dans la logique de la redevance sur les emballages ménagers mise en place à la suite du Décret de 1992 en France.

2.1 Les ménages

On suppose qu'à chaque période naît un agent représentatif vivant deux périodes. L'utilité d'un agent né en t s'écrit :

$$U\left(c_t^y, Q_t, c_{t+1}^o, Q_{t+1}\right) = u\left(c_t^y\right) + \theta z\left(Q_t\right) + \beta\left[u\left(c_{t+1}^o\right) + \theta z\left(Q_{t+1}\right)\right]$$

où c_t^y est la consommation de première période de vie, c_{t+1}^o la consommation de seconde période, Q_t la qualité de l'environnement, qui est une externalité pour l'agent. $\theta \in [0,1]$ mesure la sensibilité à la qualité de l'environnement, $\beta \in [0,1]$ est un facteur d'escompte individuel. Les composantes instantanées de la fonction d'utilité u et z sont croissantes, strictement concaves, homothétiques et satisfont les conditions d'Inada. L'agent maximise sa fonction d'utilité sous les contraintes budgétaires suivantes :

$$\begin{cases} w_t + \pi_t^{R,i} - T_t^y = c_t^y + s_t \\ c_{t+1}^o = \left(1 + r_{t+1}\right)\left(1 - \tau_{t+1}^k\right) s_t + T_{t+1}^o \end{cases}$$

A sa première période de vie, l'agent jeune perçoit un revenu total, égal à la somme d'un salaire w_t (l'offre de travail est unitaire et inélastique) et des profits des firmes $\pi_t^{R,i}$ (dont il est propriétaire[8]), avec lequel il épargne s_t et consomme. En seconde période l'individu vieux est retraité et consomme l'intégralité de son épargne rémunérée au taux d'intérêt r_{t+1}. τ_t^k est le taux de taxe sur l'épargne. T_t^i $(i = y, o)$ représente des transferts forfaitaires. Les conditions nécessaires du premier ordre déterminent la règle d'arbitrage entre consommations présente et future :

$$u'_{c_t^y} - \beta\left(1 + r_{t+1}\right)\left(1 - \tau_{t+1}^k\right) u'_{c_{t+1}^o} = 0$$

2.2 La production de bien vierge

Dans le secteur (concurrentiel) de la production de bien vierge V, les conditions technologiques de production, écrites en grandeurs par tête de jeunes en t, sont représentées par la fonction $f(\cdot)$ suivante, à rendements d'échelle constants et respectant les conditions d'Inada :

$$y_t^V = f(k_t) \quad \text{avec} \quad f'(\cdot) > 0\,; \quad f''(\cdot) \leq 0$$

La firme représentative de ce secteur maximise son profit :

$$\max_{k_t} \pi_t = f(k_t) - w_t - \left(1 + r_t\right) k_t$$

[8] Les profits sont distribués aux jeunes ce qui signifie que les firmes sont la propriété des générations actives. Cette hypothèse revient à supposer l'existence de deux sous-populations de ménages (des salariés et des entrepreneurs) continues et de taille constante, normalisée à 1. Comme les préférences sont homothétiques et identiques pour tous les consommateurs, le mode de distribution des revenus entre ces deux groupes n'a aucune conséquence.

Avec dépréciation totale du stock de capital en une période, les conditions du premier ordre égalisent la productivité marginale des facteurs à leurs coûts réels et sont données par :

$$\begin{cases} f'(k_t) = 1 + r_t \\ f(k_t) - k_t f'(k_t) = w_t \end{cases}$$

2.3 La production de bien recyclé

On suppose qu'il existe dans l'économie une deuxième firme, également en situation de concurrence, produisant un substitut parfait au bien vierge. Cette firme intègre les activités de récupération et de recyclage R. Comme Swan (1980) et Martin (1982), nous supposons que l'unique facteur utilisé est le bien vierge usagé récupéré et que les rendements sont décroissants (caractéristique de l'activité de *récupération*). Les conditions technologiques de production sont représentées par la fonction $g(\cdot)$ suivante, respectant les conditions d'Inada :

$$y_t^R = g(R_t) \quad \text{avec} \quad g'(\cdot) > 0\,; \quad g''(\cdot) < 0$$

La firme représentative de ce secteur maximise son profit :

$$\begin{cases} \max\limits_{R_t} \pi_t^{R,i} = g(R_t) - \left(p_t^j + \gamma\left(1 + \sigma_t^R\right)\right) R_t \\ \text{s.c. } R_t \leqslant \phi y_{t-1}^V \end{cases}$$

La contrainte repose sur l'hypothèse que la ressource vierge y^V dure une période avant d'être récupérée puis recyclée. Par conséquent, le stock de matières disponibles en t dépend du montant de la production de produit vierge de la période précédente $t-1$: l'offre de matières récupérables en t est supposée égale à ϕy_{t-1}^V. $\phi \in [0,1[$ traduit le fait qu'une partie du stock de matériau n'est pas récupérable (*coût de déperdition* lié à l'activité de *récupération*, voir Martin (1982)).

p_t^j est le prix payé pour les déchets. Les déchets sont collectés, puis proposés au secteur des récupérateurs recycleurs par l'Etat (ou les collectivités territoriales) au prix p_t^j. Ce prix peut être fixé soit par les conditions concurrentielles d'un marché des résidus ($j = M$), soit arbitrairement par l'Etat ou les collectivités locales ($j = F$) et peut, dans ce cas être gratuit ($j = O$).[9] $\gamma \in [0,1[$, payé en termes d'unités de matières récupérées, représente des coûts[10] liés à l'activité de *recyclage* : une partie du matériau

[9] Ces trois modes alternatifs de détermination du prix des déchets (variable au gré du marché, fixe ou nul) correspondent à trois réalités industrielles. Dans le premier cas les cours fluctuent dans le même sens que ceux des matières premières. Le deuxième cas correspond par exemple à la garantie de reprise d'Eco-Emballages entre 1992 et 2005. Le troisième correspond par exemple à l'application de la Directive européenne (2002) sur les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), certains ordinateurs usagés étant effectivement récupérés à prix nul en 2006.

[10] Ce coût correspond à un coût *iceberg* : une partie des biens fond durant le transport (Samuelson (1954), Helpman et Krugman (1985)). Ce prélèvement sur la ressource a des conséquences sur l'équilibre du marché des biens et services (*cf. eq.* (3)).

récupéré est perdue au cours de cette activité (*taux de chute* lié à l'activité de *recyclage*, voir Martin (1982)). Enfin, σ_t^R représente une taxe (si $\sigma_t^R > 0$), ou une subvention, décidée par l'Etat.

La demande de facteurs de production se résume[11] par (tableau 1) :

$$R_t^* = \min \quad \left[\phi y_{t-1}^V ; g'^{-1}\left(p_t^j + \gamma\left(1+\sigma_t^R\right)\right)\right] \quad \forall j$$

Dans le cas où p_t^j est flexible ($j = M$), le marché des résidus est naturellement en équilibre et la quantité récupérée et recyclée est égale à l'offre de résidus. Les conditions d'optimalité sont :

$$R_t^* = g'^{-1}\left(p_t^j + \gamma\left(1+\sigma_t^R\right)\right)$$

Lorsque p_t^j est fixe ($j \neq M$), la contrainte de disponibilité de la ressource impose l'examen de deux cas (a et b).

Dans le cas où la contrainte de disponibilité n'est pas saturée (cas non contraint, noté cas a), on a :

$$R_t^d \leqslant \phi y_{t-1}^V$$

L'offre d'inputs est excédentaire, le surplus est détruit et disparaît définitivement de notre économie. Les conditions nécessaires d'optimalité sont toujours :

$$R_t^* = g'^{-1}\left(p_t^j + \gamma\left(1+\sigma_t^R\right)\right)$$

qui est constant puisque p_t^j est fixe. Le récupérateur-recycleur ne souhaite pas récupérer tout le gisement disponible[12]. S'il le faisait, il se trouverait dans une situation où le coût marginal serait supérieur au prix, il choisit donc de demander une quantité inférieure. Ce cas correspond à celui des plastiques, par exemple.

Dans le cas où la contrainte de disponibilité est saturée (cas contraint, noté cas b), on a :

$$R_t^d > \phi y_{t-1}^V$$

Le secteur ne peut satisfaire sa demande de facteur de production, nous obtenons alors :

$$R_t^* = \phi y_{t-1}^V$$

Toute la quantité de matière primaire susceptible d'être récupérée est recyclée. Le récupérateur-recycleur demande toute la quantité disponible du gisement. Soit cela correspond exactement à la situation dans laquelle il

[11] Dans le cas concurrentiel, il y a égalité entre les deux termes ; les prix p_t^M étant flexibles, ils permettent à toute date de retrouver l'équilibre. La quantité notionnelle est indicée (d) et la quantité effective ($*$) .

[12] Cette situation traduit, en revanche, une situation d'inefficacité sociale puisqu'une ressource gratuite, permettant de produire un bien non polluant, est détruite.

égalise coût marginal et prix. Soit il souhaiterait une quantité supérieure au gisement disponible mais il bute sur la contrainte de disponibilité de l'input. Ce cas correspond, par exemple, aux métaux, au verre et à certains types de papiers-cartons.

Dans le cas de prix non concurrentiel ($j \neq M$), le fait que la contrainte de disponibilité soit saturée ou non est endogène. On montre que la contrainte de disponibilité est saturée si :

$$\phi y_{t-1}^{V} \leqslant g'^{-1}\left(p_t^j + \gamma\left(1+\sigma_t^R\right)\right) \quad \forall j \neq M \tag{1}$$

Ce résultat s'interprète ainsi : le récupérateur recycleur a intérêt à tout recycler lorsque *(i)* la quantité récupérable ϕ est faible ; *(ii)* la quantité de bien vierge produite à la période précédente y_{t-1}^{V} est faible ; *(iii)* le coût du recyclage γ et/ou le prix p_t^j sont bas.

La condition (1) détermine la valeur seuil de l'intensité capitalistique (k^c) pour laquelle le secteur change de régime (passant du cas contraint au cas non contraint) :

$$k_{t-1} < \; f^{-1}\left(\frac{g'^{-1}\left(p_t^j + \gamma\left(1+\sigma_t^R\right)\right)}{\phi}\right) \quad (k^c) \qquad \forall j \neq M \tag{2}$$

Ainsi, si le stock de capital en $t-1$ est en dessous de ce seuil (noté k^c), l'offre de matériau récupérable en t sera trop faible, la firme de recyclage sera soumise à une contrainte sur sa demande de facteur.
Les profits de ce secteur sont redistribués aux ménages jeunes (qui en sont propriétaires) sous la forme de transferts forfaitaires. Ces profits sont notés $\pi^{R,i}$ avec $i = (M, a, b)$ selon que l'entreprise de recyclage soit non contrainte ($j = M$ et $j = a$) ou contrainte ($j = b$) sur sa demande de facteurs de production. Dans le cas contraint, puisque le recycleur-récupérateur n'égalise plus le coût réel du facteur à sa productivité marginale, le profit peut être nul, voire négatif, ce qui se traduit par la non production de la firme. La contrainte de non négativité du profit dans le cas contraint est donnée par :

$$\frac{g\left(\phi f\left(k_{t-1}\right)\right)}{\phi f\left(k_{t-1}\right)} \geqslant p_t^j + \gamma\left(1+\sigma_t^R\right) \qquad \forall j \neq M$$

En cas de contrainte sur les inputs, cette condition impose une borne supérieure à γ pour que l'activité soit maintenue. Pour certaines conditions portant sur $g(.)$ (concave à valeurs positives), on montre que la condition déterminée par la relation (2) est une condition suffisante pour que $\pi^{R,i} \geqslant 0$, $\forall i$. En d'autres termes, la demande de biens recyclables est contrainte lorsque γ est en dessous d'un certain seuil (défini par eq. (2)), ce seuil correspondant à un coût suffisamment faible assurant ainsi la non négativité des profits.

Prix j	$M : flexible$	$F, O : fixe$	
Contrainte i sur la ressource	cas M	cas $a : k_{t-1} \geqslant k^c$	cas $b : k_{t-1} < k^c$
Productivité marginale	$g' = p^M + \gamma\left(1 + \sigma_t^R\right)$	$g' = p_t^j + \gamma\left(1 + \sigma_t^R\right)$	$g' > p_t^j + \gamma\left(1 + \sigma_t^R\right)$
Input	$R_t^d = R_t^* = \phi f\left(k_{t-1}\right)$	$R_t^d = R_t^* \leqslant \phi f\left(k_{t-1}\right)$	$R_t^d > R_t^* = \phi f\left(k_{t-1}\right)$

TAB. 1 – Synthèse secteur du recyclage

2.4 La loi d'évolution de la qualité de l'environnement

La dynamique de l'indice de qualité environnementale est régie par la loi d'évolution suivante :

$$Q_{t+1} = \tilde{Q} + [1 - h]\, Q_t - b y_t^V$$

où $h \in [0, 1]$ représente le taux de variation autonome de l'environnement et $b > 0$ le taux de dégradation de l'environnement suite à la production du secteur primaire. Ici la dégradation de l'environnement est liée au processus industriel du secteur de production de bien vierge (rejets dans l'eau, l'air, etc.). La production de bien recyclé, quant à elle, ne diminue pas la qualité de l'environnement. Notre hypothèse revient à considérer b comme un taux net d'émission de polluants entre la production de biens vierges et recyclés.[13]

2.5 Le budget de l'Etat

Le budget de l'Etat est équilibré à toutes les périodes :

$$T_t^o = \tau_t^k\left(1 + r_t\right) s_{t-1} + \left(p_t^j + \gamma\sigma_t^R\right) R_t + T_t^y \quad \forall j = (M, F, O)$$

Ce budget prend en compte les transferts forfaitaires, la taxe sur les rendements du capital et la taxe/subvention applicable au secteur de la récupération recyclage.

2.6 L'équilibre concurrentiel

L'équilibre sur le marché du capital s'écrit :

$$s_t = k_{t+1}$$

[13] Dans le cas de l'acier, la production d'une tonne d'acier vierge émet quatre fois plus de CO_2 dans l'atmostphère que la production d'une tonne d'acier recyclé. Néanmoins, il peut exister, pour certains matériaux, un seuil de production au-delà duquel le recyclage devient plus polluant (*ie.* $b \leq 0$). Ce cas de figure pourrait avoir pour conséquence de modifier le signe de la valeur optimale des instruments fiscaux, afin de décourager l'activité de recyclage. Nous ne considérons pas ce cas de figure, mais ce dernier ne poserait pas de difficulté.

L'équilibre sur le marché des biens est aussi la contrainte emplois-ressources de l'économie (une partie de la ressource est perdue au cours de l'activité de recyclage (taux de chute γ)) :

$$y_t^V + y_t^R = c_t^y + c_t^o + k_{t+1} + \gamma R_t \tag{3}$$

L'équilibre de notre économie est défini par une suite de décisions, de prix et de taxes $\left\{y_t^V, y_t^R, k_t, R_t, c_t^y, c_t^o, s_t, w_t, r_t, T_t^y, \tau_t^k, \sigma_t^R, p_t^j\right\}_{t=1}^{\infty}$ telle que, à chaque date $t = 1, 2...$: (i) les agents maximisent leur utilité sous leurs contraintes budgétaires ; (ii) les firmes V et R maximisent leur profit (sous contrainte de disponibilité des ressources) ; (iii) les marchés sont en équilibre (y compris le marché des résidus, dans le cas $j = M$) ; (iv) l'indice de qualité environnementale évolue selon sa loi ; (v) $\{k_0, Q_0, R_0\}$ sont données.

L'équilibre stationnaire est tel que $k_{t+1} = k_t = k^*$. A l'état stationnaire, l'équilibre[14] est défini par le système suivant $\forall i = (M, a, b)$ et $\forall j = (M, F, O)$:

$$\begin{cases} f'_k = 1 + r^* \\ f(k^*) - k^* f'_k = w^* \\ w^* + \pi^{R,i^*} - T^y = c^{y^*} + s^* \\ c^{o^*} = \left(1 - \tau^k\right)(1 + r^*)\, s^* + T^o \\ k^* = s^* \\ \frac{u'_{c^o}}{u'_{c^y}} = \frac{1}{\beta(1+r^*)\left(1-\tau^k\right)} \\ \tau^k (1 + r^*)\, s^* + T^y + \left(p^{j*} + \gamma\sigma^R R^*\right) = T^o \\ R^* \leqslant \phi f(k^*) \\ g' \geqslant p^{j*} + \gamma\left(1 + \sigma^R\right) \\ \pi^{R,i^*} = g(R^*) - \left(p^{j*} + \gamma\left(1 + \sigma^R\right)\right) R^* \\ Q^* = \frac{\tilde{Q} - bf(k^*)}{h} \end{cases} \tag{4}$$

Dans le cas de rigidité du prix ($j \neq M$), il existe deux régimes stationnaires possibles selon la valeur de k^* relativement à $k^c = f^{-1}\left[\frac{g'^{-1}\left(p^{j*}+\gamma\left(1+\sigma^R\right)\right)}{\phi}\right]$. Si $k^* \leqslant k^c$ (cas b), alors $R^* = \phi f(k^*)$. Dans le cas a ($k^* > k^c$), alors $R^* = g'^{-1}\left(p^{j*} + \gamma\left(1 + \sigma^R\right)\right) < \phi f(k^*)$.

3 L'optimum de long terme

On suppose l'existence d'un planificateur cherchant à maximiser l'utilité de l'ensemble des générations, escomptée par un facteur d'actualisation

[14] Pour assurer l'existence, l'unicité et la stabilité de l'équilibre stationnaire de laissez-faire, il faut vérifier (i) les conditions d'Inada et d'homothétie des fonctions de production et de préférences, (ii) la condition de non-négativité du profit, (iii) que le taux de substitution intertemporel entre consommation jeune et consommation vieux ne soit pas trop faible (bien normal).

social, noté δ $(0 < \delta < 1)$, en exploitant l'ensemble des ressources disponibles dans l'économie (vierges et recyclées). k_0, Q_0 et R_0 sont données. Le programme du planificateur s'écrit :

$$\max \sum_{t=1}^{+\infty} \delta^{t-1} \left(u\left(c_t^y\right) + \theta z\left(Q_t\right) + \beta \left[u\left(c_{t+1}^o\right) + \theta z\left(Q_{t+1}\right) \right] \right)$$

sous les contraintes suivantes :

$$\begin{cases} y_t^V + y_t^R = c_t^y + c_t^o + k_{t+1} + \gamma R_t & (\forall t = 1, ..., +\infty) \\ Q_{t+1} = \tilde{Q} + [1-h]\, Q_t - b y_t^V & (\forall t = 1, ..., +\infty) \\ R_t = \phi y_{t-1}^V & (\forall t = 1, ..., +\infty) \\ y_t^V = f(k_t) & \\ y_t^R = g(R_t) & \end{cases}$$

On associe à la contrainte de ressources de la période t le multiplicateur $\delta^t \lambda_{1,t}$; de même, à la contrainte d'évolution de Q_t on associe le multiplicateur $\delta^t \lambda_{2,t}$. Les conditions nécessaires d'optimalité donnent, en particulier :

$$\lambda_2 = \frac{(1-h)\,\theta\; z'\,(\delta + \beta)}{1 - \delta\,(1-h)} > 0 \tag{5}$$

λ_2 est le prix implicite de la qualité environnementale. Il s'interprète comme le bénéfice social marginal de la variation de la qualité de l'environnement. Il doit être égal à la valeur escomptée de l'utilité marginale de l'environnement. Ainsi, $(1-h)\,\theta\; z'$ représente l'impact de long terme de l'environnement, sur les deux générations coexistantes, δ et β étant les pondérations correspondantes. On retrouve également le taux d'escompte pertinent pour les politiques de l'environnement défini par Marini et Scaramozzino (1995) , égal à la somme du taux d'escompte social pur $\frac{1}{\delta} - 1$ et du taux d'assimilation naturelle h.

$(g' - \gamma)$ est le rendement social du recyclage. Lorsque le planificateur alloue une unité de ressource supplémentaire au secteur de recyclage, celle-ci permet de produire davantage, mais avec un coût γ. L'effet du recyclage sur l'environnement, et donc sur le bien-être, transite par λ_1.

On détermine enfin le prix implicite du capital[15] :

$$\lambda_1 = \frac{\frac{b f' \theta z' (\delta + \beta)}{1 - \delta(1-h)}}{f'\left(1 + \delta\left(g' - \gamma\right)\phi\right) - \frac{1}{\delta}} > 0 \tag{6}$$

Ce prix implicite est positif si et seulement si $f' > \frac{1}{\delta(1+\delta(g'-\gamma)\phi)} \left(= \hat{k}_{orm}^v \right)$, ce qui traduit que dans notre économie avec pollution, le planificateur va

[15] λ_1 est strictement positif si et seulement si $f' > \frac{1}{\delta} \frac{1}{1+\delta(g'-\gamma)\phi} = \hat{k}_{orm}^v$ (règle d'or modifiée verte $\hat{k}_{orm}^v$) $= \hat{k}_{orm} \frac{1}{1+\delta(g'-\gamma)\phi}$. On remarque qu'en l'absence d'activités de recyclage ($\phi = 0$), le stock de capital optimal est défini par la règle d'or modifiée $\hat{k}_{or}$ $\left(\text{tel que } f'_{\hat{k}_{orm}}(.) = \frac{1}{\delta}\right)$.

fixer un niveau d'intensité capitalistique plus faible que celui déterminé par la règle de simple maximisation de la consommation totale (optimum de Samuelson). Ainsi, le niveau de capital optimal est plus faible que le niveau défini par la règle d'or modifiée (voir condition (8)).

La règle d'arbitrage intergénérationnel définie par le planificateur est donnée par :

$$u'_{c^y} = \frac{\beta}{\delta} v'_{c^o} \tag{7}$$

C'est une règle standard donnant la relation optimale entre c^y et c^o. On détermine les expressions optimales $\hat{c}^y$ et $\hat{c}^o$ en fonction du stock de capital à l'optimum $\hat{k}$, défini par la règle suivante :

$$f'\left(\hat{k}\right) = \frac{1}{\delta} \frac{1}{\left[\left(1 + \delta\left(g' - \gamma\right)\phi\right) - \frac{b\theta z'(\delta+\beta)}{u'_{c^y}(1-\delta(1-h))}\right]} \tag{8}$$

On constate que lorsque le recyclage permet de produire davantage de biens (R et donc $g(R)$ augmentent, ou ϕ est plus élevé), la productivité marginale du recyclage décroît (g' baisse, *ceteris paribus*), alors $\hat{k}$ baisse également : dans ce cas, le bien recyclé se substitue à la production de bien vierge. Le stock optimal de capital est une fonction décroissante du rapport $\frac{\theta z'}{u'_{c^y}}$: plus la sensibilité environnementale est élevée et plus le planificateur cherche à faire diminuer cette externalité.

La solution du programme du planificateur à l'état stationnaire peut être résumée par le système suivant, qui détermine $\left\{\hat{c}^y, \hat{c}^o, \hat{k}, \hat{R}, \hat{Q}\right\}$:

$$\begin{cases} u' = \frac{\beta}{\delta} u' \\ f'\left(\hat{k}\right) = \frac{1}{\delta} \frac{1}{\left[(1+\delta(g'-\gamma)\phi) - \frac{b\theta z'(\delta+\beta)}{u'_c(1-\delta(1-h))}\right]} \\ \hat{R} = \phi f\left(\hat{k}\right) \\ g\left(\hat{R}\right) + f\left(\hat{k}\right) = \hat{c}^o + \hat{c}^y + \hat{k} + \gamma\hat{R} \\ \hat{Q} = \frac{\bar{Q} - bf\left(\hat{k}\right)}{h} \end{cases} \tag{9}$$

4 La décentralisation de l'optimum

Nous cherchons les taux de taxes que doit proposer un planificateur de telle sorte que l'équilibre concurrentiel (système (4)) coïncide avec l'optimum de long terme (système (9)). L'Etat fait face à trois sources d'inefficacités économiques : inefficience dynamique induisant la sur ou sous-accumulation du capital ; production vierge polluante ; disponibilité de l'input du secteur de recyclage contrainte entraînant éventuellement un régime

de déséquilibre. La structure optimale de taxes-transferts se compose donc de trois instruments ($\hat{T}^y$, $\hat{\tau}^k$ et $\hat{\sigma}^R$). La politique fiscale doit permettre de retrouver : l'intensité capitalistique définie par la règle d'or modifiée ($\hat{T}^y$) ; internaliser les flux de polluants issus de la production ($\hat{\tau}^k$) ; inciter la firme de recyclage à récupérer exactement le montant de ressources disponibles, en cas de marché manquant du facteur ($\hat{\sigma}^R$). Un quatrième instrument $\widehat{T}^o$ s'ajuste pour équilibrer le budget de l'Etat.

Concernant la taxe sur l'épargne ($\hat{\tau}^k$), on obtient la valeur optimale suivante :

$$\hat{\tau}^k = \frac{b\theta z' (\delta + \beta)}{u'_{c^y} (1 - \delta (1 - h))} - \delta \left(g' - \gamma\right) \phi \gtreqless 0$$

Cette taxe permet de corriger l'externalité environnementale : elle est donc d'autant plus élevée que le dommage marginal ($b\theta z' (\delta + \beta)$) est grand relativement à l'utilité marginale de la consommation u'_{c^y}. En revanche, plus le secteur de récupération recyclage est efficace, et plus l'externalité environnementale diminue, jusqu'à disparaître. Ceci nous amène à conclure qu'une productivité marginale (g') du recyclage élevée, combinée à un taux de récupération fort (ϕ), permet de faire disparaître l'externalité de pollution : l'Etat pourrait donc avoir recours à un instrument en moins.

En ce qui concerne la taxe sur le secteur de la récupération recyclage ($\hat{\sigma}^R$), en cas d'absence de marché concurrentiel des résidus[16] ($j \neq M$), nous obtenons :

$$\frac{g' - p^j}{\gamma} - 1 = \hat{\sigma}^R \gtreqless 0$$

Cette taxe peut être positive ou négative (subvention), selon le niveau du coût de la récupération et du prix décidé par l'Etat. Le cas de subvention correspond à la politique française d'Eco-Emballages, ainsi qu'à la politique européenne d'Eco-participation portant sur les appareils électroniques et électroménagers. Il faut inciter à ce que tout le gisement disponible soit récupéré et recyclé, ni plus ni moins. Cet instrument doit permettre au recycleur de maximiser son profit en récupérant et en recyclant exactement le montant de biens vierges récupérables. Inversement, cette taxe est positive si les coûts liés à l'activité de recyclage (γ) ou le prix de mise à disposition des déchets sont faibles. La firme de recyclage, dans ce cas, souhaite davantage de déchets : la taxe vient compenser la faiblesse des coûts et vient pallier le problème de tarification des déchets.

Enfin, l'équilibre sur le marché du capital nous permet de déterminer la taxe forfaitaire portant sur les jeunes. Cette relation est telle que :

$$\hat{k} = s \left(w \left(\hat{k}\right) - \hat{T}^y + \hat{\pi}^R \left(\hat{k}\right) + \frac{\hat{T}^o}{(1 + r^*) \left(1 - \hat{\tau}^k\right)}, r \left(\hat{k}\right) \right)$$

[16] Si p^j est flexible (*ie.* $j = M$), on obtient simplement $\hat{\sigma} = 0$.

Cette condition fixe le prélèvement fiscal permettant de corriger l'inefficience dynamique de notre équilibre, et ainsi d'atteindre le stock de capital défini par la règle d'or modifiée.

5 Conclusion

Cet article analyse trois caractéristiques du secteur de la récupération recyclage. D'une part il permet de lutter contre une externalité de pollution issue du processus de production de bien vierge . D'autre part les facteurs de production utilisés par ce secteur sont des déchets disponibles en quantité limitée. Enfin leur prix peut ne pas être concurrentiel.

Nous montrons que si l'activité de recyclage est efficace, elle permet de lutter plus fortement contre l'externalité environnementale, ce qui vient réduire le taux de la taxe environnementale, jusqu'à la rendre nulle.

Nous montrons également qu'il faut subventionner le secteur de la récupération recyclage lorsqu'il n'existe pas de marché concurrentiel des déchets et que le coût de la récupération recyclage est élevé. En revanche, le récupérateur recycleur sera taxé si ses coûts sont faibles. L'intervention publique sur ce secteur disparaît dès lors qu'il existe un prix concurrentiel des déchets : cela nécessite au préalable de préciser la définition juridique des déchets, afin que la notion de droit de propriété puisse s'y appliquer.

6 Bibliographie

Choe C., Fraser I. M., (1999), "An economic analysis of household waste management", *Journal of Environmental Economics and Management*, 38, 234-246.

Dasgupta P.S., Heal G., (1979), *Economic Theory of Exhaustible Resources*, James Nibset-Cambridge University Press, Cambridge.

Diamond P.A., (1965), "National Debt in a Neoclassical Model", *American Economic Review*, 55, 1126-1250.

Fullerton D., Kinnaman T.C., (1995), "Garbage, Recycling, and Illicit Burning or Dumping", *Journal of Environmental Economics and Management*, 29, 78-91.

Fullerton D., Wu W., (1998) :"Policies for Green Design", *Journal of Environmental Economics and Management*, 36, 131-148.

Gaskins D.W. Jr, (1974), "Alcoa Revisited : Welfare Impications of a Secondhand Market", *Journal of Economic Theory*, 7, 254-271.

Grant D., (1999), "Recycling and market power : A more general model and re-evaluation of the evidence", *International Journal of Industrial Organization,* 17, 59-80.

Helpman, E., P.R. Krugman, (1985), *Market Structure and Foreign Trade.* Cambridge (MA), The MIT Press.

John, A., R. Pecchenino, (1994), "An Overlapping Generations Model of Growth and the Environment," *The Economic Journal*, 104, 1393-1410.
Keeler A.G., Renkow M., (1994), "Haul Trash or Haul Ash : Energy Recovery as a Component of Local Solid Waste Management", *Journal of Environmental Economics and Management*, 27, 205-217.
Lusky R., (1976), "A model of recycling and pollution control", *Canadian Journal of Economics*, 9 (1), 91-101.
Mäler K.G., (1974), *Environmental Economics : A Theoretical Inquiry*, John Hopkins University Press, Baltimore, MD.
Marini G., Scaramozzinno P., (1995), "Overlapping Generations and Environmental Control", *Journal of Environmental Economics and Management*, 29, 64-77.
Martin R.E., (1982), "Monopoly Power and the Recycling of Raw Materials", *The Journal of Industrial Economics*, 30 (4), 104-419.
Palmer K., Walls M., (1997), "Optimal policies for solid waste disposal : Taxes, subsidies and standards", *Journal of Public Economics*, 65, 193-205.
Solow R., (1986), "On the Intergenerational Allocation of Natural Resources", *Scandinavian Journal of Economics*, 88, 141-149.
Samuelson P.A., (1954), "The transfer problem and transport cost, II : analysis of effects of trade impediments", *Economic Journal,* 64, 264-289.
Suslow V.Y., (1986), "Estimating monopoly behavior with competitive recycling : an application to Alcoa", *Rand Journal of Economics,* 17 (3).
Swan P.L., (1980), "Alcoa : The Influence of Recycling on Monopoly Power", *Journal of Political Economy,* 88 (1), 76-99.
W.C.E.D., (1987), *Our Common Futur*, Rapport de la *World Commission for Environment and Development* "Commission Bruntland" des Nations-Unies.