



**Bureau
d'économie
théorique
et appliquée
(BETA)**
UMR 7522

Documents de travail

« Contrôle des émissions polluantes et combinaison optimale transferts / permis »

Auteurs

Mourad Afif, Sandrine Spaeter

Document de Travail n° 2009 - 20

Mai 2009

Faculté des sciences économiques et de gestion

Pôle européen de gestion et
d'économie (PEGE)
61 avenue de la Forêt Noire
F-67085 Strasbourg Cedex

Secrétariat du BETA

Géraldine Manderscheidt
Tél. : (33) 03 90 24 20 69
Fax : (33) 03 90 24 20 70
g.manderscheidt@unistra.fr
<http://cournot2.u-strasbg.fr/beta>



Nancy-Université
Université Nancy 2



Contrôle des émissions polluantes et combinaison optimale transferts/permis¹

Mourad AFIF ²

Sandrine SPAETER³

Avril 2009

¹Les auteurs remercient les participants aux Journées de l'AFSE (Toulouse, 2008), aux JMA (Agadir, 2008), au séminaire BETA à Strasbourg, ainsi que Paul Pezanis-Christou, Marie Pfiffelmann et François Salanié pour leurs nombreux commentaires sur ce travail.

²BETA, Université de Strasbourg et CNRS, 61 avenue de la Forêt Noire, 67085 Strasbourg Cedex. E-mail : afif@cournot.u-strasbg.fr

³BETA, Nancy-Université et CNRS, 13, Place Carnot, C.O. 70026, 54035 NANCY CEDEX. E-mail : spaeter@cournot.u-strasbg.fr

Contrôle des émissions polluantes et combinaison optimale transferts/permis

Résumé

Dans cet article nous construisons un système de contrôle des émissions polluantes qui combine permis d'émission et taxes sur la base du modèle de Roberts et Spence (1976). Nous relâchons l'hypothèse de linéarité de la fonction de transferts monétaires entre le régulateur et les firmes. Le régulateur n'observe pas les technologies d'abattement des firmes. Chaque firme choisit son montant initial de permis et son niveau effectif d'émissions. Elles peuvent ensuite se tourner vers le régulateur pour solder leur demande nette excédentaire (positive ou négative). Nous montrons que le système combiné permis/taxe généralisé permet de répliquer parfaitement la fonction de dommage social estimée. Si l'estimation des coûts faite par le régulateur est parfaite, l'optimum social est atteint. Ce système apporte plus de souplesse au contrôle de la pollution et permet de réduire les coûts d'acquisition de l'information par le régulateur grâce à une autodifférenciation des firmes. Cette intervention du régulateur en dernier ressort constitue une soupape de sécurité contre une éventuelle demande (offre) élevée de permis. Il améliore la liquidité du marché des permis d'émission.

Mots clés : Taxes ; Efficience ; permis d'émission.

Classification JEL : H23 ; D82 ; Q52.

Abstract

In this paper, we propose an environmental regulation policy that combines emission permits and taxes. Contrary to Roberts and Spence (1976), we do not impose any linearity to the monetary transfer function that applies between firms and the regulator. The regulator does not observe the abatement technologies of the heterogeneous firms. Each firm chooses an initial volume of permits and its effective level of emissions. Then it can get in touch with the regulator in order to sell out its net demand in excess (negative or positive). We show that a combined and generalized system tax/permits allows it to duplicate the estimated social cost function. If the estimation made by the regulator is perfect, the social optimum is achieved. This system brings some flexibility to the pollution control mechanism and allows it to reduce the costs of information acquisition by the regulator thanks to an implicit differentiation of the firms. This intervention of the regulator as a last resort can be considered as a safety net when facing a (too) high demand (or supply) of permits. It improves the liquidity of the emission permits market.

Key words : Taxes ; efficiency ; emission permits.

JEL Classification : H23 ; D82 ; Q52.

1 Introduction

En générant des externalités négatives, la pollution coûte plus à la collectivité qu'à ses émetteurs témoignant ainsi d'une défaillance du marché dans la tarification de l'utilisation de l'environnement. Le choix des instruments de régulation dépend directement du coût marginal d'abattement des émissions mais aussi de plusieurs autres considérations telles que l'acceptabilité politique, l'impact sur l'incitation à développer l'innovation, l'effet sur le bien-être,...

Les approches réglementaires classiques (*command and control*) permettent, sous certaines conditions, de garantir le résultat environnemental. Mais elles ne permettent pas la minimisation des coûts. En effet, la mise en place de limites quantitatives à l'émission de substances nocives ou l'interdiction d'utilisation de certains biens qui ne prend pas en compte l'hétérogénéité des coûts d'abattement des firmes peut s'avérer chère voire contre-

productive et peut freiner l'activité de certaines firmes. Ceci explique en partie l'orientation de la recherche vers certains instruments économiques devant inciter à la réduction des émissions, tels que les taxes sur les émissions et/ou la possibilité d'échanger des permis.

Avec ce type d'instruments (taxes, permis, ...), le régulateur est, *a priori*, en mesure de tirer profit de l'hétérogénéité des coûts d'abattement de la pollution - qui découle naturellement de la différence de structure de production et de technologie utilisée - pour réduire conjointement les émissions des firmes au coût minimum ([15]). Ces instruments doivent favoriser l'adoption de la technologie la plus appropriée à la structure et à l'objectif de chaque firme¹.

Les permis d'émissions ou les taxes peuvent réduire efficacement le niveau global de pollution, mais ils sont peu employés par rapport aux outils *command and control* ([15]). Les permis d'émission ont été souvent perçus à tort comme une forme de privatisation de l'environnement. Or la version originale de ces permis, introduite par [4] (p. 94-95), réserve un rôle fondamental au régulateur dans l'échange des permis. Concernant les taxes, elles permettaient jusqu'à présent essentiellement d'alimenter les caisses de l'Etat² mais elles ne contribuent pas toujours à lutter efficacement contre la pollution. Le taux de la taxe n'est pas toujours fixé de façon à donner un signal économique qui incite à atteindre le niveau de pollution prédéfini par le régulateur (pour des raisons liées au manque d'information sur les coûts d'abattement des firmes, mais également à des problèmes d'acceptabilité politique ou sociale). Il en résulte une dépendance budgétaire accentuée vis-à-vis de ces taxes tandis que la qualité de l'environnement continue de se dégrader.

L'extension des travaux de [2] faite par [4] a donné lieu aux premières réflexions théoriques sur l'idée d'un possible échange des émissions de pollution, converties en permis d'émission (ou droits à polluer). Cet instrument de contrôle de la pollution est souvent opposé à la taxe pigouvienne ([12]) tant par sa conception théorique, son acceptabilité³

¹Pour des analyses de l'effet de l'application de ces instruments sur l'innovation, voir [9] et [5].

²On compte environ 375 taxes prélevées dans les pays de l'OCDE. Le produit des taxes liées à l'environnement représente entre 2.5% et 3% du PIB (en moyenne), soit 7% du total des recettes (en moyenne). Les taxes sur les carburants et transports représentent 90% de ces recettes, *Sources : OCDE*.

³L'application de cette approche pour internaliser la pollution nécessite la définition des droits de

que par son application pratique⁴.

Du point de vue de la théorie économique, la régulation de la pollution par la taxe ou par les permis d'émissions échangeables conduit à l'optimum social en cas d'information parfaite sur les coûts d'abattement ([17]). En pratique, l'avantage social cherché de la connaissance de ces coûts peut pourtant être facilement contrebalancé par l'importance des coûts d'acquisition de celle-ci, parfois exorbitants, et suffit à détourner l'objectif du régulateur vers la recherche d'une solution moins efficace, de second rang.

Si les coûts d'abattement sont incertains, nous savons, d'après l'analyse de [17], que la supériorité d'un instrument sur l'autre dépend de la comparaison des pentes des courbes de coûts et de bénéfices au voisinage de l'optimum. Moins le régulateur est certain de ces estimations des coûts d'abattement, plus la décision de contrôler les émissions par l'un des deux instruments purs devient risquée.

Nous pouvons alors nous poser la question de la pertinence d'une combinaison des instruments taxe et permis. [18] montre⁵ qu'un système hybride permet d'atteindre un bien-être social supérieur ou égal à un système simple basé soit sur la taxation des émissions soit sur l'échange de permis en présence d'incertitude sur les coûts d'abattement des firmes. [13], tout en montrant empiriquement la supériorité d'un système de taxation sur les permis lorsque la fonction des bénéfices est assez "plate", conclut également à l'amélioration du bien-être social avec un système combiné taxes/permis. Il met notamment en avant l'intérêt de la flexibilité d'un tel système qui permet, grâce à l'échange de permis, de préserver les propriétés liées à la distribution de rentes. Enfin, les travaux de propriété, ce qui peut être considéré comme une voie libérale vers la privatisation de l'environnement [1].

⁴Dans le cadre de la pollution de l'eau par exemple, l'Europe privilégie l'intervention de l'Etat via l'utilisation de taxes, tandis que les Etats-Unis préconisent plutôt une régulation directe par le marché, en instaurant (même pour les marchés des engrais) l'échange de permis d'émission (Cf. par exemple [16] et [?]).

⁵[11] argumentent en faveur d'un système similaire pour contrôler la pollution de l'air. Ils proposent ainsi d'autoriser les pays à allouer certains permis supplémentaires à leurs émetteurs. Ces permis sont achetés par les gouvernements à prix fixe négocié au niveau international. Ceci leur permettrait de réagir à une éventuelle flambée du prix des permis si la réduction s'avérait être coûteuse.

[14] sont encore une contribution à cette littérature. Dans un cadre statique, ils montrent qu'un instrument combinant taxe et permis permet de "se rattrapper" en cas d'erreur d'estimation des coûts d'abattement. Dans leur modèle, chaque firme émettrice peut acquérir une dotation initiale en permis d'émission auprès du régulateur. Si les coûts totaux du secteur se sont avérés plus élevés que ceux estimés par le régulateur (entraînant un manque de permis sur le marché), le régulateur autorise les firmes à polluer au delà de leurs dotations initiales en contrepartie d'une pénalité. Au contraire, s'ils sont plus faibles que prévus, le régulateur intervient pour éviter la chute du prix des permis en achetant le surplus d'abattement en échange d'une subvention.

Ce système garantit à la firme le paiement d'un prix plafond sous forme d'une pénalité lorsque la dotation initiale ne suffit pas pour couvrir la totalité de ses émissions. Il assure également une incitation minimale à la dépollution sous forme d'une subvention versée à la firme qui n'épuise pas la totalité de sa dotation initiale en permis. Notons dès à présent qu'un tel système basé sur l'estimation imparfaite des coûts d'abattement ne permet pas de garantir *ex post* l'équilibre du budget de l'agence chargée de collecter les taxes ou de verser les subventions.⁶

Ces résultats ont été obtenus par Roberts et Spence en supposant que le marché des permis ne s'ouvre que pour les nouveaux entrants et se referme une fois l'allocation initiale choisie. Puis le régulateur devient l'unique contrepartie des firmes. Si l'on normalise le prix des permis initiaux à zéro, ce système se ramène à un pur système de transferts monétaires. Par ailleurs, Roberts et Spence ne considèrent qu'une fonction de transfert des firmes vers le régulateur linéaire dans la demande et l'offre de droits à émettre. Ceci ne leur permet que d'approximer la fonction de dommage, supposée convexe, par une fonction linéaire par morceaux (les taux de taxes et de subvention étant fixes, mais différents par hypothèse).

L'hypothèse qui consiste à supposer que seul le régulateur est offreur de permis sur le marché n'est pas un véritable obstacle à l'obtention d'une solution socialement optimale (si elle existe) dans la mesure où les firmes choisissent optimalement le niveau initial de

⁶Pour une analyse spécifique de cette question dans un contexte de pollution diffuse, le lecteur peut se référer à [8].

leurs dotations⁷ dans Roberts et Spence (1976).

La seconde hypothèse, qui consiste à poser 1) que la fonction de transfert entre le régulateur et la firme est linéaire et 2) que le taux de transfert monétaire en cas d'émission au-delà de la dotation initiale est strictement supérieur au transfert obtenu si les efforts d'abattements sont significatifs doit, en revanche, être discutée. Notamment parce qu'elle limite la forme de la fonction de transfert que le régulateur peut adopter pour approximer au mieux la fonction de dommages.

Dans cet article, nous généralisons le système combiné permis/taxe proposé par Roberts et Spence à des fonctions de transferts non nécessairement linéaires. Précisément, le régulateur n'observe pas les technologies d'abattement des firmes et considère une estimation des coûts agrégés. Chaque firme choisit le montant initial des permis qu'elle se verra allouer ainsi que son niveau effectif d'émissions. Son objectif est la minimisation de ses coûts totaux de dépollution (égaux aux coûts d'abattement plus la dépense en dotation initiale plus éventuellement des transferts avec le régulateur). Dans Roberts et Spence, les entreprises peuvent, une fois les permis achetés, en racheter d'autres à un taux de taxe fixe p au régulateur ou, au contraire, lui vendre leur excédent à un taux de subvention fixe s . Les deux taux étant, par hypothèses différents, Roberts et Spence considèrent ainsi un transfert entre firmes et régulateur dont la fonction est linéaire pour toute demande excédentaire de permis strictement négative ou positive. La fonction de dommage social étant convexe, les auteurs ne peuvent que l'approximer à l'aide d'une fonction linéaire par

⁷Notons cependant qu'il ne s'agit pas de la règle en pratique. En général, le régulateur sollicite l'avis des experts pour fixer la quantité maximale qui ne constitue pas un danger pour l'environnement et l'écosystème. C'est le cas notamment de la quantité des GES (Gaz à effet de serre) recommandée par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ([6]) dans leurs rapports et qui a servi par la suite à fixer les allocations des pays signataires du protocole du Kyoto. Dans son rapport, le GIEC recommande la réduction immédiate des émissions de CO_2 de 50 à 70 % pour stabiliser sa concentration au niveau actuel. Pour la période 2005-07, les pays de l'UE ont émis 2,2 milliards de tonnes de CO_2 . En France, le plan national d'allocation des quotas (PNAQ) concerne huit secteurs industriels et prévoit l'allocation gratuite de 165,51 Million de tonnes par an. Les firmes peuvent ensuite se positionner en acheteur ou en vendeur sur le marché.

morceaux, que l'estimation du coût agrégé soit parfaite ou non.

Dans ce travail, nous dépassons leur cadre d'analyse en considérant une fonction de transfert non linéaire dans les demandes nettes de droits à polluer. Nous construisons une fonction de transfert qui ne dépend pas des types des firmes (donc de leurs coûts d'abattement), mais qui duplique la fonction de dommage social estimé. La fonction de transfert que l'on obtient est convexe, tout comme la fonction de dommage social. La réplication est parfaite lorsque l'estimation des coûts agrégés faite par le régulateur est parfaite. Si son estimation est imparfaite (sous-estimation ou sur-estimation des couts d'abattement), la fonction de transfert réplique une fonction de dommage marginal calculée sur la base d'émissions des firmes estimées.

Sous l'hypothèse de concurrence entre les firmes et d'hétérogénéité des technologies, nous montrons également que la décentralisation des décisions des firmes en matière d'émissions conduit encore à une solution qui correspond à celle que l'on aurait obtenue dans un modèle à une firme représentative qui minimiserait la somme des coûts individuels de dépollution. Ainsi, si le régulateur estime correctement les coûts agrégés du secteur, le niveau des émissions totales du secteur correspond au niveau des permis mis sur le marché par le régulateur. Si le régulateur sous-estime les coûts globaux d'abattement du secteur, le système mixte permet alors aux firmes de dépasser le niveau d'émission initialement autorisé par le régulateur, mais moyennant le paiement d'un transfert supplémentaire. Le résultat est symétrique si les coûts globaux sont sur-estimés par le régulateur.

L'ensemble de notre analyse est menée dans un cadre statique. La robustesse de nos résultats à une analyse dynamique peut alors être discutée. Ce point n'est pas l'un des objets de cet article. Notons toutefois que les travaux empiriques de [13] permettent de conclure qu'un système hybride continue d'être au moins aussi performant qu'un simple système de taxes ou de permis après plusieurs périodes.

L'article est organisé de la manière suivante. Dans la seconde section de l'article, nous présentons le modèle généralisé. Nous analysons les caractéristiques des équilibres possibles et nous relâchons l'hypothèse de linéarité de Roberts et Spence. Nous étudions ainsi la

forme que la fonction de transfert (imposée par le régulateur aux firmes) doit (et peut) prendre pour qu'un équilibre puisse émerger. Nous étudions également les conditions qui mènent de l'équilibre à l'optimum dans le contexte d'asymétrie d'information qui nous occupe.

La troisième section de l'article est consacrée au programme d'optimisation du régulateur. Nous montrons notamment que seules les firmes ayant des coûts d'abattement bas (par rapport à une fourchette moyenne) ou des coûts d'abattement élevés s'adresseront au régulateur. Ce système permet alors au régulateur d'obtenir "gratuitement" de l'information sur les coûts d'une partie des entreprises du secteur. Nous discutons des marges de manoeuvre du régulateur dans la quatrième section. La dernière section conclut l'article en présentant les implications empiriques de nos résultats.

2 Le modèle

Considérons une entreprise i qui a la possibilité de réduire sa pollution moyennant un coût d'abattement $C^i(x_i, \theta_i)$, avec x_i son volume d'émission de polluants et θ_i son type qui détermine la structure de son coût marginal d'abattement. On pose les hypothèses raisonnables suivantes :

Hypothèse 1. 1 *Soit \bar{x}_i le niveau d'émission privé de la firme i en l'absence de contrainte environnementale. On pose :*

$$\begin{aligned} C^i(\bar{x}_i, \theta_i) &= 0 \quad \forall \theta_i \\ C^i_{x_i} &< 0, \quad C^i_{x_i x_i} > 0 \\ C^i_{\theta_i} &> 0 \end{aligned}$$

La réduction d'émission au niveau x_i peut être due à des changements dans les quantités d'intrants ou de biens produits. Nous travaillons à technologie donnée : cette baisse des émissions entraîne une baisse du profit de la firme. En supposant que le marché du bien produit est en concurrence, cette baisse de profit équivaut au coût social d'abattement⁸.

⁸Ce résultat est démontré par Roberts et Spence (1976), page 195, note de bas de page 3.

Le régulateur ignore le type de la firme i . Il choisit une allocation globale de permis, $l = \sum_{i=1}^n l_i$. L'allocation l_i de la firme i est qualifiée d' "initiale" car elle est distribuée une seule fois avant la mise en place d'un système de transferts monétaires entre le régulateur et la firme. Aucune firme n'est autorisée à émettre au delà de ce que lui permet son allocation initiale sans se procurer l'équivalent auprès du régulateur.

La firme décide du nombre de permis l_i initialement alloués et les paie au prix unitaire $q \geq 0$. Elle décide également de son niveau optimal d'émission x_i en sachant que tout excédent par rapport à sa dotation initiale devra faire l'objet d'un paiement supplémentaire (et inversement, toute économie pourra faire l'objet d'une compensation). Nous retenons ainsi l'hypothèse de Roberts et Spence (1976) selon laquelle les transactions sur les demandes supplémentaires de droits nettes des allocations initiales se font exclusivement avec le régulateur. En revanche, nous relâchons l'hypothèse de linéarité de la fonction de transfert et nous cherchons sa forme optimale.

Hypothèse 2. 1 Soit $t(z_i)$ une fonction de transfert monétaire de la firme vers le régulateur, avec $z_i = x_i - l_i$ la demande nette d'émissions que la firme i adresse au régulateur. On a soit $z_i \leq 0$ (surplus de droits) soit $z_i \geq 0$ (besoin en droits d'émission). On pose $t(0) = 0$.

Le programme de minimisation des coûts de la firme i s'écrit :

$$\underset{l_i, x_i}{\text{Min}} CT_i(x_i, \theta_i) = C^i(x_i, \theta_i) + q.l_i + t(z_i) \quad \forall x_i \in [0; \bar{x}_i] ; z_i = x_i - l_i \quad (1)$$

Lemme 1. 1

(i) Les conditions de premier ordre du programme (1) s'écrivent :

$$\begin{cases} x_i^* & / & \frac{\partial C^i(x_i^*, \theta_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial t(z_i^*)}{\partial z_i} = 0 \\ l_i^* & / & q - \frac{\partial t(z_i^*)}{\partial z_i} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

(ii) Pour que les conditions du second ordre soient vérifiées, il est nécessaire et suffisant que $\frac{\partial^2 t(z_i)}{\partial z_i \partial z_i} > 0$.

Les points (i) et (ii) du lemme 1 nous permettent de conclure que la fonction de transfert doit être croissante et convexe pour qu'une solution intérieure puisse émerger. La fonction linéaire par morceaux considérée par Roberts et Spence (1976) n'est alors qu'un cas particulier de notre modélisation. Dans Roberts et Spence (1976), le transfert marginal est en effet égal à $s > 0$ pour des demandes nettes négatives et à $p > 0$ pour des demandes nettes positives. Les auteurs supposent également que $s < p$. Leur fonction de transfert est ainsi supposée linéaire avec un point de non différentiabilité en $x_i = l_i$. Les propriétés de la fonction de transfert que nous obtenons sont générales et résultent des conditions de l'optimisation.

Nous analysons dans ce qui suit les propriétés de l'équilibre.

Considérons⁹ tout d'abord le niveau optimal de permis que l'entreprise achète initialement. Notons $\frac{\partial t(z_i)}{\partial z_i} \Big|_{z_i > 0} \equiv t_{z_i^+}(z_i)$ et $\frac{\partial t(z_i)}{\partial z_i} \Big|_{z_i < 0} \equiv t_{z_i^-}(z_i)$.

– Si $q < \lim_{z_i \downarrow -\infty} t_{z_i^-}(z_i)$

Dans ce cas, toutes les firmes, quel que soit leur coût marginal de dépollution, achètent une quantité infinie de permis au prix q pour pouvoir ensuite revendre l'excédent au régulateur et recevoir le transfert marginal $t_{z_i^-}(\cdot)$. Cet équilibre n'est pas soutenable sur le marché des permis.

– Si $q > \lim_{z_i \uparrow +\infty} t_{z_i^+}(z_i)$

Aucune firme n'achète de permis sachant qu'elles peuvent les acquérir tous à un prix moindre auprès du régulateur. Aucune transaction n'a alors lieu sur le marché des permis et cet équilibre est également écarté.

Associés au lemme 1, ces premiers résultats nous permettent de dériver les propriétés de la fonction de transfert.

Proposition 1 *Pour qu'un équilibre intérieur existe, la fonction de transfert $t(z)$ doit être*

(i) *croissante, convexe,*

(ii) *telle que $\lim_{z_i \downarrow -\infty} t_{z_i^-}(z_i) \leq q \leq \lim_{z_i \uparrow +\infty} t_{z_i^+}(z_i)$, à prix unitaire q des permis donné.*

⁹Dans ce qui suit, nous travaillons avec les limites des pentes de la fonction de transfert $t(z_i)$. Ceci nous permet d'envisager des fonctions qui ne sont pas systématiquement différentiables en $z_i = 0$.

Précisons maintenant les caractéristiques des choix optimaux des firmes en matière d'achat/vente de permis et d'émissions.

– Si $\lim_{z_i \uparrow 0} t_{z_i^-}(z_i) > q$

Dans ce cas, il existe un niveau $z_i^* < 0$ tel que $t_{z_i^-}(z_i^*) = q$: la firme choisit un niveau d'émissions x_i^* inférieur au niveau l_i^* de permis qu'elle achète initialement sur le marché des permis. D'après (2) et pour $l_i = l_i^*$, le montant optimal x_i^* vérifie :

$$-\frac{\partial C^i(x_i^*, \theta_i)}{\partial x_i} = t_{z_i^-}(z_i^*) = q \quad (3)$$

– Si $\lim_{z_i \uparrow 0} t_{z_i^-}(z_i) \leq q \leq \lim_{z_i \downarrow 0} t_{z_i^+}(z_i)$

Dans ce cas, l'entreprise choisit les quantités telles que $l_i^* = x_i^*$ et

$$-\frac{\partial C^i(l_i^*, \theta_i)}{\partial x_i} = q \quad (4)$$

Notons que si la fonction $t(z)$ est différentiable en zéro, on a alors $\lim_{z_i \uparrow 0} t_{z_i^-}(z_i) = \lim_{z_i \downarrow 0} t_{z_i^+}(z_i) = t_{z_i}(0) = q$.

– Si $\lim_{z_i \downarrow 0} t_{z_i^+}(z_i) < q$

Il existe alors un niveau $z_i^* > 0$ tel que $t_{z_i^+}(z_i^*) = q$. La firme est demandeuse de droits à l'optimum : $l_i^* < x_i^*$ avec x_i^* qui satisfait

$$-\frac{\partial C^i(x_i^*, \theta_i)}{\partial x_i} = t_{z_i^+}(z_i^*) = q \quad (5)$$

Nos résultats sont résumés dans la proposition qui suit et illustrés par la figure 1.

Proposition 2 (i) *A l'optimum, toutes les firmes égalisent leur coût marginal d'abattement au prix unitaire d'achat des permis :*

$$\forall i, \quad x_i^* \quad / \quad -\frac{\partial C^i(x_i^*, \theta_i)}{\partial x_i} = q$$

(ii) *En présence d'asymétrie d'information sur les coûts d'abattement des firmes, le mécanisme décentralisé mixte marché/régulateur permet une distribution efficace des abattements au sein de la population des firmes :*

$$-\frac{\partial C^i(x_i^*, \theta_i)}{\partial x_i} = -\frac{\partial C^j(x_j^*, \theta_j)}{\partial x_j} \quad \forall i, \forall j.$$

Figure 1

Une conséquence importante du point (ii) de la proposition 2 est que le régulateur n'a besoin d'estimer que le coût agrégé de dépollution. Notons $C(x, \theta) = \sum_i C^i(x_i, \theta_i)$ la fonction de coûts agrégée, avec $x = \sum_i x_i$ et θ le vecteur des types θ_i des firmes. Notons encore $\hat{\theta}$ l'estimation de θ faite par le régulateur. S'il estime parfaitement la fonction agrégée des coûts, nous avons alors $C(x, \hat{\theta}) = C(x, \theta)$ et $x = l$ à l'équilibre, l étant décidé par le régulateur. Toutefois, le régulateur ne peut obtenir qu'une estimation plus ou moins précise de θ . Il doit ainsi décider d'un niveau agrégé l de permis à mettre sur le marché sur la base de cette seule estimation et peut se tromper. Formellement, en partant de la proposition 2, le régulateur doit choisir un niveau agrégé l qui vérifie $-\frac{\partial C(l, \hat{\theta})}{\partial x} = q$. Trois cas sont alors possibles selon que $-\frac{\partial C(x^*, \theta)}{\partial x}$ est égal (estimation parfaite), supérieur (sur-estimation) ou inférieur (sous-estimation) à $-\frac{\partial C(l^*, \theta)}{\partial x}$. Ils sont résumés dans la proposition 3 qui suit.

Proposition 3 *A l'équilibre, le couple (x^*, l^*) vérifie :*

$$(i) \quad -\frac{\partial C(l^*, \hat{\theta})}{\partial x} = -\frac{\partial C(x^*, \theta)}{\partial x} = q, \quad x^* = \sum_i x_i^* \quad \text{et} \quad l^* = \sum_i l_i^*$$

$$(ii) \quad \begin{cases} \text{Si } \hat{\theta} = \theta \text{ alors } z^* = x^* - l^* = 0 \text{ et } \lim_{z \downarrow 0} t_{z^-}(z) \leq q \leq \lim_{z \uparrow 0} t_{z^+}(z) \\ \text{Si } \hat{\theta} < \theta \text{ alors } z^* = x^* - l^* > 0 \text{ et } q = t_{z^+}(z^*) \\ \text{Si } \hat{\theta} > \theta \text{ alors } z^* = x^* - l^* < 0 \text{ et } q = t_{z^-}(z^*) \end{cases}$$

La condition (i) est une conséquence directe de la proposition 2. Le régulateur fixe un niveau de permis qui égalise le coût marginal agrégé *estimé* au prix q du permis. Les firmes décident ensuite de leurs émissions x_i^* de telle sorte que la somme de leurs émissions individuelles aboutit à un niveau d'émission agrégé qui égalise le vrai coût marginal agrégé au prix du permis. Si l'estimation est parfaite, alors les firmes n'émettront ni plus ni moins que la dotation agrégée en permis l^* . Si, au contraire, l'estimation n'est pas parfaite, le second ou le troisième cas du point (ii) prévaut. Précisément, si le régulateur a sous-estimé

les coûts de dépollution en fixant le nombre l^* de permis initialement disponibles à un niveau trop faible, le solde des émissions net des permis sera positif. Le véritable coût marginal de dépollution évalué en l^* étant, en moyenne, plus élevé que son estimation faite par le régulateur, les émissions x^* seront supérieures aux permis l^* mis sur le marché. A l'inverse, une sur-estimation des coûts de dépollution conduit à une situation où les firmes dépolluent plus que ce qui est initialement prévu par le régulateur : $x^* < l^*$.

Par ailleurs, le modèle permet encore de reproduire une solution décentralisée (chaque firme choisit ses valeurs x_i^* et l_i^*) en solution centralisée : une entreprise représentative (ou résultant de la fusion de toutes les entreprises) choisit les paramètres qui mènent à l'équilibre ($x^* = \sum x_i^*$ et $l^* = \sum l_i^*$). Si le régulateur estime correctement le coût agrégé, l'équilibre mènera à l'optimum social. Si ce n'est pas le cas, l'introduction d'une fonction de transfert $t(z)$ doit permettre de s'en rapprocher.

Dans la section qui suit, nous nous intéressons au programme du régulateur et à la duplication de la fonction de dommage social par la fonction de transfert. Nous devons notamment définir les taux de transferts pour les offres et demandes nettes de permis lorsque l'estimation des coûts agrégés n'est pas parfaite.

3 La minimisation des coûts par le régulateur

Le régulateur doit choisir la forme de la fonction de transfert $t(z)$ ainsi que le volume de permis l à mettre initialement sur le marché. Son objectif est la minimisation des coûts totaux attendus de l'émission de polluants par les firmes sachant qu'il n'observe pas les types des firmes mais en a une estimation $\hat{\theta}$. Il fixe ainsi un niveau $l = l(\hat{\theta})$.

Il peut néanmoins prendre en considération le fait que les firmes à bas coût de dépollution seront potentiellement offreurs nets d'émissions tandis que celles ayant les coûts de dépollution les plus élevés seront demandeurs nets d'émission. Il existe ainsi une catégorie de firmes à coût intermédiaire qui émettront exactement la quantité de permis qu'elles auront décidé d'acquérir initialement. Formellement, supposons que les types θ sont dis-

tribués sur un intervalle $[0, \bar{\theta}]$ et notons $f(\theta)$ la fonction de densité associée. Les indices des variables font référence, ici, à un type donné de firmes et non à une seule firme. Il peut ainsi exister plusieurs firmes de même type θ_i . Définissons θ_1 et θ_2 les niveaux qui satisfont :

$$\begin{aligned} -\frac{\partial C(l, \theta_1)}{\partial x} &= \lim_{z^- \uparrow 0} t_{z^-}(z) \\ -\frac{\partial C(l, \theta_2)}{\partial x} &= \lim_{z^+ \downarrow 0} t_{z^+}(z) \end{aligned}$$

D'après la proposition 3, on a alors $x^*(\theta) < x^*(\theta_1) = l(\theta_1)$ pour tout $\theta < \theta_1$ et $x^*(\theta) > x^*(\theta_2) = l(\theta_2)$ pour tout coût de type $\theta > \theta_2$. En notant encore $x(\theta) |_{\theta < \theta_1} = x_1(\theta, t_{z^-}(z_1))$, $x(\theta) |_{\theta > \theta_2} = x_2(\theta, t_{z^+}(z_2))$, $z_1 = x_1(\theta, t_{z^-}(z_1)) - l(\theta_1)$ et $z_2 = x_2(\theta, t_{z^+}(z_2)) - l(\theta_2)$ les fonctions qui satisfont

$$\begin{aligned} -\frac{\partial C(x_1(\theta, t_{z^-}(z_1)), \theta)}{\partial x} &= t_{z^-}(z_1) \\ -\frac{\partial C(x_2(\theta, t_{z^+}(z_2)), \theta)}{\partial x} &= t_{z^+}(z_2) \end{aligned} ,$$

les coûts totaux espérés s'écrivent :

$$\begin{aligned} \mathbb{C}(t_{z^+}, t_{z^-}, l) &= \int_0^{\theta_1} [D(x_1(\theta, t_{z^-}(z_1))) + C(x_1(\theta, t_{z^-}(z_1)), \theta)] f(\theta) d\theta \\ &+ \int_{\theta_1}^{\theta_2} [D(l) + C(l, \theta)] f(\theta) d\theta \\ &+ \int_{\theta_2}^{\bar{\theta}} [D(x_2(\theta, t_{z^+}(z_2))) + C(x_2(\theta, t_{z^+}(z_2)), \theta)] f(\theta) d\theta \end{aligned} \quad (6)$$

Les conditions de premier ordre du programme de minimisation de $\mathbb{C}(t_{z^+}, t_{z^-}, l)$ par rapport à x_1 , x_2 et l s'écrivent :

$$\begin{aligned} x_1^* \text{ est tel que } E(D'(x_1^*) + \frac{\partial C(x_1^*, \theta)}{\partial x} \mid \theta \leq \theta_1) &= E(D'(x_1^*) - t_{z^-}(z_1^*) \mid \theta \leq \theta_1) = 0 \\ l^* \text{ est tel que } E(D'(l^*) + \frac{\partial C(l^*, \theta)}{\partial x} \mid \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2) &= 0 \\ x_2^* \text{ est tel que } E(D'(x_2^*) + \frac{\partial C(x_2^*, \theta)}{\partial x} \mid \theta \geq \theta_2) &= E(D'(x_2^*) - t_{z^+}(z_2^*) \mid \theta \geq \theta_2) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Soit x^{**} le niveau agrégé optimal d'émissions en cas d'information complète sur leurs coûts. Dans un tel contexte, le régulateur pourrait alors décider d'une fonction agrégée de permis à mettre sur le marché $l^{**}(\theta) = x^{**}(\theta)$ qui vérifierait

$$D'(x^{**}) + \frac{\partial C(x^{**}, \theta)}{\partial x} = 0 \text{ pour tout type } \theta \text{ parfaitement connu} \quad (8)$$

On aurait alors un niveau optimal l^{**} qui minimise les coûts sociaux attendus de la pollution. Il s'agit de l'optimum de premier rang.

Lorsque l'information est incomplète, ce sont les conditions de premier ordre (7) qui prévalent. La fonction de dommage marginal $D'(x)$ qui sert de support de duplication à la fonction de transfert est une fonction estimée sur la base de $\hat{\theta}$: $D'(x) \equiv D'(x(\hat{\theta}))$. Nos résultats sont finalement résumés dans la proposition 4 qui suit.

Proposition 4 *Sachant que le système de prix est tel que seuls les types $\theta < \theta_1$ (respectivement $\theta > \theta_2$) s'adressent au régulateur en dernier ressort avec une demande excédentaire nette z positive (respectivement négative), l'optimum de second rang est tel que :*

(i) *la fonction de transfert duplique parfaitement la fonction de dommage marginal estimé $D'(x^*(\hat{\theta}))$ avec $t_{z-}(z) = D'(x_1(\hat{\theta}))$, $t_{z+}(z) = D'(x_2(\hat{\theta}))$ et $t(0) = 0$.*

(ii) *Si l'estimation est parfaite (c'est-à-dire $\hat{\theta} = \theta$), on retrouve l'optimum de premier rang : $x^*(\theta) = l^*(\hat{\theta})$.*

(iii) *Si l'estimation est imparfaite (c'est-à-dire $\hat{\theta} \neq \theta$), les agents ajusteront leur dotation en permis en s'adressant, dans un second temps, au régulateur. On aura alors $x^*(\theta) > l^*(\hat{\theta})$ si $\hat{\theta} < \theta$ ou $x^*(\theta) < l^*(\hat{\theta})$ si $\hat{\theta} > \theta$.*

Ainsi, en autorisant la non linéarité de la fonction de transfert, nous sommes en mesure de dupliquer la fonction de dommage marginal pour tout θ estimé et de nous rapprocher (voire de l'atteindre si l'estimation est parfaite) de l'optimum de premier rang. Ces résultats sont obtenus en travaillant sur une estimation de la fonction de coûts agrégés et non sur les fonctions individuelles.

Finalement, à prix des permis donné, si la quantité totale de permis mise sur le marché correspond à celle qui minimise la somme des coûts individuels de dépollution, la quantité

totale de pollution émise respecte l'objectif du régulateur ($\sum_i l_i = \sum_i x_i$). Son intervention est inutile. Les pollueurs arbitrent entre leurs coûts marginaux d'abattement et le prix d'équilibre des permis. Ainsi, la norme est respectée et les plus gros efforts d'abattement sont assurés par les firmes qui ont les coût marginaux d'abattement les plus bas. Le régulateur se contente dans ce cas d'organiser et de faciliter la confrontation de l'offre et de la demande des permis.

En revanche, il est possible qu'il sous-estime soit les coûts d'abattement des firmes ayant une technologie de dépollution coûteuse, soit la taille de la population de ce type de firmes par rapport à la population des firmes à coûts d'abattement faibles ou moyens. Dans ce cas, l'offre de permis risque d'être inférieure à la demande sur le marché au point d'entraîner une hausse significative du prix des permis : le régulateur peut alors être amené à dévier de l'équilibre des permis à court terme. Il peut notamment décider de proposer un transfert marginal inférieur ou égal à un prix plafond afin de corriger la mauvaise estimation. Ainsi, les firmes les moins avantagées en matière technologique pourront se tourner vers le régulateur en dernier ressort.

Si, au contraire, les coûts d'abattements et/ou la taille de la population à hauts coûts ont été sur-estimés, le régulateur peut également adopter une position plus conciliante en proposant des transferts, cette fois aux offreurs de droits, à un taux plus élevé que le bénéfice marginal, faible, qu'ils retireraient de leurs efforts de dépollution sur le marché des permis. Le prix seuil à partir duquel le régulateur aura intérêt à dévier de l'équilibre va dépendre de la composition de la population des firmes et de l'objectif de dépollution à atteindre.

Pour illustrer l'intérêt d'un tel système, observons le prix du permis d'émission du carbone échangé sur le marché européen des quotas de CO_2 en 2007 : il a baissé de 80% en deux ans. Cette chute est due à une surallocation de crédits de CO_2 de la part des gouvernements européens à leurs entreprises (l'allocation initiale devait se faire selon la procédure du *grand fathering*, base 1990). L'erreur d'estimation des coûts d'abattement n'explique pas complètement cette sur-allocation, puisqu'il faut y ajouter les volontés des

gouvernements de protéger les intérêts de leurs industriels. Néanmoins, le résultat est là ; les prix se sont effondrés et un système de transfert plus classique qui compléterait le marché des permis permettrait, ici, aux firmes ayant fait l'effort du changement technologique de vendre leurs permis en excès à un prix raisonnable.¹⁰

Au lieu de manipuler la fonction de transfert, le régulateur pourrait également influencer le coût d'abattement $C^i(x_i, \theta_i)$ en subventionnant l'achat d'une technologie de dépollution plus efficace. Une telle perspective, non envisagée dans cet article, permettrait notamment d'endogénéiser le choix technologique.

4 Conclusion

Tandis que certains pays sont plus favorables à la taxe environnementale, d'autres, particulièrement les Etats-Unis et plus récemment en Europe, constatent que le fait d'autoriser les agents à s'approprier des droits d'usage de l'environnement peut contribuer à la réduction du coût d'abattement de pollution. Cette approche a notamment donné lieu à la création d'un marché de permis d'émission de CO₂ suite au protocole de Kyoto de 1998. Ce marché est entré en vigueur en 2005 après que la Russie ait ratifié le protocole. D'autres marchés, essentiellement aux Etats-Unis, font l'objet depuis plusieurs années d'échanges de droit à polluer ou à émettre des polluants dans l'air (marché du soufre, ...), mais également dans l'eau (Clean Water Act, 1990).¹¹

Dans un contexte d'asymétrie informationnelle, la taxe et le marché des permis sont deux instruments présentant des caractéristiques que l'on peut qualifier de complémentaires. L'application d'une taxe doit inciter l'entreprise à limiter ses émissions afin de

¹⁰Notons que pour dévier de sa stratégie initiale, le régulateur peut recourir à la méthode d'*open market*, qui est l'une des trois méthodes qu'utilisent les banques centrales pour régler la masse monétaire qui circule dans l'économie.

¹¹Pour des détails sur ce dernier sujet, le lecteur peut lire Verchère (2005). En Europe, en revanche, la pollution de l'eau est plutôt appréhendée à travers les normes et les taxes ([10], [3]).

réduire le montant de la taxe à payer. Toutefois, s'agissant d'une incitation, elle ne garantit pas que l'objectif de réduction des émissions visé par le régulateur soit atteint *in fine*, notamment lorsque ce dernier ne connaît pas parfaitement la fonction de coûts d'abattement de la firme. Mais l'un de ses avantages appréciés du décideur public tient dans la possibilité de contrôler le coût de la politique mise en place et de bénéficier, dans une certaine mesure, d'un double dividende grâce à une réutilisation possible des revenus issus de la taxation. Ce contrôle du coût de la politique n'est plus possible sur un marché des permis car non quantifiable *ex post*. En revanche, l'objectif environnemental semble garanti puisque le régulateur décide de la quantité de permis mis sur le marché, et donc de la quantité totale de polluants émis. Cette quantité totale de permis peut, toutefois, être mal estimée par le régulateur en charge de la maximisation du bien-être social s'il ne détient pas toute l'information sur les types des fonctions de coûts d'abattement en présence. Au problème de l'incomplétude de l'information quant aux caractéristiques de chaque firme, que le marché des permis doit justement permettre de contourner, s'ajoute un problème d'imperfection de l'information relative aux structures mêmes des fonctions de coût. Cette incertitude peut alors biaiser les prix des permis par rapport à ceux qui prévaudraient sans incertitude et perturber ainsi les décisions économiques des agents. Les firmes peuvent finalement faire face à un problème d'excès d'offre ou de demande sur le marché des permis.

Dans un tel contexte, il peut alors être souhaitable d'envisager un contrôle des émissions polluantes basé sur un système combiné taxe et permis, tel que proposé initialement par [14]. Dans leur modèle, les entreprises peuvent, une fois les permis achetés, en racheter d'autres à un taux de taxe fixe p au régulateur ou, au contraire, lui vendre leur excédent à un taux de subvention fixe s . La fonction de dommage social étant convexe, les auteurs ne peuvent que l'approximer à l'aide d'une fonction linéaire par morceaux.

Dans cet article, nous avons dépassé leur cadre d'analyse en considérant une fonction de transfert non linéaire dans les demandes nettes de droits à polluer. Ceci nous a permis de construire une fonction de transfert qui ne dépend pas des types des firmes (donc de leurs coûts d'abattement), mais qui duplique la fonction de dommage social estimé. La

fonction de transfert que l'on obtient est convexe, tout comme la fonction de dommage social. Ainsi, si l'estimation des coûts agrégés par le régulateur est parfaite, la duplication du dommage marginal social est également parfaite.

Par ailleurs, ce système hybride permis/transferts monétaires permet encore de réduire les coûts d'acquisition de l'information par le régulateur sur les fonctions de coûts grâce à une autodifférenciation des firmes : seules celles à coût d'abattement faible ou à coût d'abattement élevé se tourneront vers le régulateur en dernier ressort afin de solder leur demande excédentaire nette (positive ou négative) de permis à des prix différents de ceux pratiqués sur le marché des permis à l'ouverture.

Cette intervention du régulateur en dernier ressort constitue finalement une soupape contre une éventuelle demande élevée de permis (et donc un prix de marché élevé). Par la récompense, ce système doit également inciter les firmes à coût d'abattement faible à dépolluer et doit ainsi éviter toute chute du prix du permis notamment lorsque le coût est surestimé par le régulateur. Un tel système aurait pu, par exemple, endiguer l'effondrement du prix des permis d'émission de CO₂ sur le marché ouvert suite à la ratification du protocole de Kyoto, en 2005. Les Etats ayant distribué plus de permis à leurs industries que les objectifs de départ, les entreprises qui avaient décidé de faire de gros efforts en matière de limitation de leurs émissions (en investissant par exemple dans des technologies plus propres) ont vu leurs perspectives de retour sur investissement disparaître à court terme dans la mesure où leurs excédents de permis avaient, à ce moment là, une valeur de marché particulièrement faible.

De manière générale, les pays de l'OCDE dans leur majorité sont favorables à l'utilisation d'une palette élargie d'instruments économiques, même si les instruments réglementaires continuent d'être fortement utilisés. Cette situation qualifiée par [7] de "schizophrénie" contribue ainsi à retarder la généralisation des instruments incitatifs et une combinaison transferts/permis pourrait l'encourager au contraire, sans compromettre la compétitivité de ces pays. Le système de transactions directes possibles (mais non obligatoires) avec le régulateur est efficace en situation d'information imparfaite, mais peut

également être un élément particulièrement rassurant et donc plus acceptable politiquement.

Références

- [1] V. Boisvert, A. Caron, and E. Rodary. Privatiser pour conserver ? une lecture critique de la nouvelle économie des ressources. *Revue Tiers monde in Problèmes économiques*, (2863) :9–14, 2004.
- [2] R. H. Coase. The problem of social cost. *Journal of Law and Economics*, 3 :1–44, 1960.
- [3] F. Cochard, S. Spaeter, A. Verchère, and M. Willinger. Pollution diffuse en milieu rural et marché des permis d'émission : les enseignements de l'expérience américaine. *Revue française d'économie*, 24(1) :juillet, 2009.
- [4] J. H. Dales. *Pollution, Property and Prices*. University of Toronto Press, Toronto, 1968.
- [5] C. Fischer, I.W.H. Parry, and W.A. Pizer. Instrument choice for environmental protection when technological innovation is endogenous. *Journal of Environmental Economics and Management*, (55) :523–545, 2003.
- [6] GIEC. *Bilan 2001 des changements climatiques*. Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, 2001.
- [7] O. Godard. Les instruments économiques au services de la lutte contre la pollution atmosphérique : le cas des permis négociables. *Cahier n° 2001-011*, 2001.
- [8] J.A. Herriges. Budget-balancing incentives mechanisms. *Journal of Environmental Economics and Management*, 27 :275–85, 1994.
- [9] A.B. Jaffe, R.G. Newell, and R.N. Stavins. Environmental policy and technological change. *Environmental and Resource Economics*, 22 :41–69, 2002.

- [10] T. Lavoux and D. Baldock. L'application du principe pollueur-payeur en agriculture. *Economie Rurale, L'agriculture et la gestion des ressources renouvelables*, (208-209) :61–65, 1992.
- [11] W.J. McKibbin and P.J. Wilcoxon. A better way to slow global climate change. Brookings Policy Brief no 27, November, The Brookings Institution, Washington D.C., 1997.
- [12] A.C. Pigou. *The Economics of Welfare*. Macmillan, London, 1932.
- [13] W. Pizer. Combining price and quantity controls to mitigate global climate change. *Journal of Public Economics*, 85 :409–434, 2002.
- [14] M. Roberts and M. Spence. Effluent charges and licenses under uncertainty. *Journal of Public Economics*, 5 :193–208, 1976.
- [15] R.N. Stavins. Experience with market-based environmental policy instruments in handbook of environmental economics. *Resources for the Future*, 1, 2001.
- [16] A. Verchère. Pollution diffuse en milieu rural et marché des permis d'émission : les enseignements de l'expérience américaine. *Economie rurale*, 285 :32–49, 2005.
- [17] M.L. Weitzman. Prices vs. quantities. *Review of Economic Studies*, 41 :477–491, 1974.
- [18] M.L. Weitzman. Optimal rewards for economic regulation. *American Economic Review*, 68 :683–691, 1978.

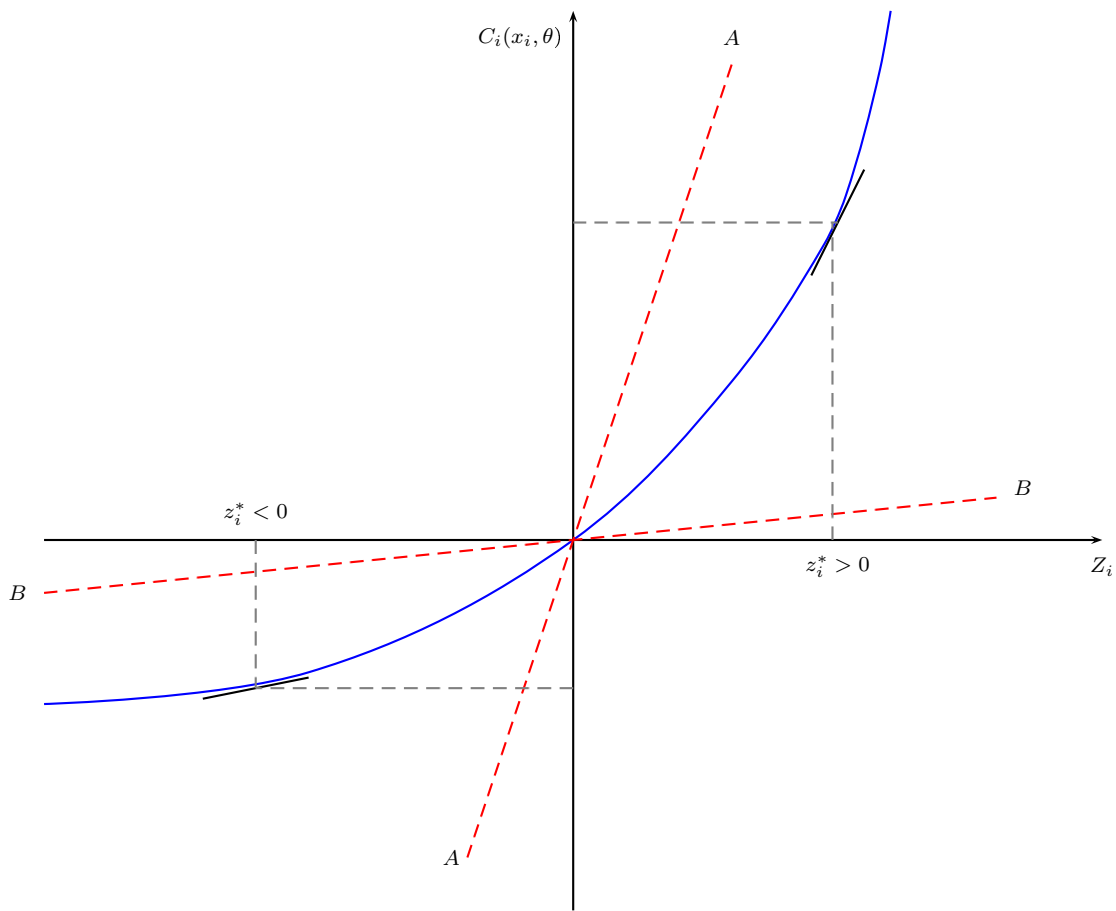


Figure 1 : optima en fonction du permis