

---

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG  
Faculté des Sciences Économiques et de Gestion

DÉPOLLUTION ET EFFICACITÉ DES  
INSTRUMENTS ÉCONOMIQUES EN SITUATION  
D'INCERTITUDE SUR LES COÛTS

THÈSE

*pour l'obtention du titre de*

**Docteur en Sciences Économiques**

*présentée et soutenue publiquement par*

**Mourad AFIF**

*Le 23 juin 2010*

**JURY**

Mme Sandrine SPAETER	Professeur, Université de Nancy 2	Directeur de thèse
M. Gilles ROTILLON	Professeur, Université Paris X - Nanterre	Rapporteur externe
M. Philippe MAHENC	Professeur, Université de Perpignan	Rapporteur externe
Mme Anne ROZAN	Professeur, ENGEES	Rapporteur interne
M. Jérôme FONCEL	Professeur, Université de Nancy 2	Examineur

*La Faculté n'entend donner aucune appro-  
bation ou improbation aux opinions émises  
dans les thèses. Ces opinions doivent être  
considérées comme propres à leurs auteurs.*

*À ma mère, à ma mère, à ma mère,  
À mon père,  
À ma femme,  
À ma sœur et mes frères*

# Remerciement

Arrivé au terme de cette thèse de doctorat, je désire tout d'abord exprimer ma profonde gratitude au professeur Sandrine Spaeter pour m'avoir encadré avec patience au long de ces années d'étude, pour m'avoir fait confiance, pour la qualité de son regard critique et de son ouverture d'esprit lors de nos échanges. Je suis particulièrement reconnaissant pour ses remarques et propositions de corrections qui m'ont aidé à améliorer significativement la qualité de ce travail ainsi que pour son soutien à ma participation dans de nombreux colloques.

Je suis très honoré par la présence des professeurs Anne Rozan, Gilles Rotillon, Philippe Mahenc et Jérôme Foncel qui ont accepté de participer au jury de cette thèse. Je tiens à les remercier pour l'intérêt qu'ils ont manifesté à l'égard de mes recherches.

Au cours de ces années de thèse, j'ai eu des échanges avec plusieurs membres du laboratoire BETA. Aussi, je remercie les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce travail : Yves Kuhry pour m'avoir fait découvrir L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, pour ses conseils et pour ses commentaires sur certains points de cette thèse, puis Fustine, Naouel, Adeline, Benjamin et Jean-Philippe pour le temps qu'ils ont consacré à la relecture de mon travail. Enfin, je n'oublie pas les autres collègues du bureau 126 : Li, Walliya, Jin et Qiao pour leur soutien et surtout pour leur enthousiasme ; ils ont contribué à rendre ce bureau plus convivial.

Je dédie ce travail à mes amis, en particulier à Tayeb pour tous les moments de discussion et de détente inoubliables passés ensemble.

Enfin, merci à toutes les personnes que j'ai oublié de citer et qui, je l'espère, se reconnaîtront ici.

# Table des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 ÉTAT DE LA QUESTION ET PROBLÉMATIQUE</b>	<b>14</b>
1.1 Pollution : définition et caractéristiques . . . . .	14
1.1.1 Objectif « zéro pollution » n'est pas socialement sou- haitable . . . . .	14
1.1.2 À caractéristique différente, un outil de régulation dif- férent . . . . .	17
1.2 Efficacité du principe pollueur-payeur . . . . .	19
1.3 Régulation de la pollution en information complète . . . . .	23
1.3.1 Taxe et subvention . . . . .	26
1.3.2 Permis d'émission négociables (PEN) . . . . .	30
1.3.3 Équivalence entre la taxe pigouvienne et les permis d'émission . . . . .	33
1.4 Incertitude et choix d'instruments de régulation de pollution .	36
1.4.1 Taxe sur les intrants . . . . .	38
1.4.2 Taxe ambiante . . . . .	40
1.4.3 Combinaison taxe-permis . . . . .	41
1.5 Conclusion . . . . .	45
<b>2 TAXE OU PERMIS VS TAXE-PERMIS</b>	<b>46</b>
2.1 Introduction . . . . .	46
2.2 Régulation de pollution : analyse formelle . . . . .	47
2.2.1 Taxe pigouvienne . . . . .	52
2.2.2 Allocation des permis d'émission négociables . . . . .	53
2.2.3 Discussion . . . . .	55
2.3 Régulation de pollution en pratique : « <i>Prices vs. Quantities</i> »	57
2.3.1 Information parfaite . . . . .	57
2.3.2 Incertitude sur le coût . . . . .	59
2.3.3 Analyse de Weitzman et principaux résultats . . . . .	62

2.4	Taxe et permis en situation d'incertitude sur le coût de dépollution . . . . .	66
2.4.1	Régulation de pollution par combinaison d'instruments . . . . .	67
2.4.2	Problème d'optimisation du régulateur . . . . .	74
2.5	Conclusion . . . . .	79
<b>3</b>	<b>COMBINAISON OPTIMALE PERMIS-TRANSFERT</b>	<b>82</b>
3.1	Introduction . . . . .	82
3.2	Modèle . . . . .	85
3.3	Minimisation des coûts par le régulateur . . . . .	92
3.4	Marges de manœuvre du régulateur . . . . .	96
3.5	Conclusion . . . . .	97
<b>4</b>	<b>ANTISÉLECTION, PERMIS D'ÉMISSION ET DIFFÉRENCIATION OPTIMALE DES PRIX</b>	<b>99</b>
4.1	Introduction . . . . .	99
4.2	Principaux aperçus . . . . .	103
4.3	Optimum de premier rang . . . . .	105
4.3.1	Niveau optimal agrégé de permis . . . . .	107
4.3.2	Allocation optimale des permis . . . . .	108
4.3.3	Détermination des prix à l'optimum de premier rang . . . . .	109
4.4	Antisélection et distorsions de prix . . . . .	113
4.4.1	Optimum de second rang . . . . .	113
4.5	Conclusion . . . . .	117
<b>5</b>	<b>INCITATION À L'ADOPTION DE TECHNOLOGIES PROPRES</b>	<b>119</b>
5.1	Introduction . . . . .	119
5.2	Cadre général du modèle et quantité optimale de pollution . . . . .	122
5.3	Information parfaite du coût de dépollution . . . . .	127
5.3.1	Régulation de la pollution par une taxe . . . . .	127
5.3.2	Régulation de la pollution par des permis . . . . .	129
5.4	Surestimation du coût marginal de dépollution . . . . .	132
5.5	Sous estimation du coût marginal de dépollution . . . . .	137
5.5.1	Cas d'une innovation radicale . . . . .	137
5.5.2	Cas d'une technologie incrémentale . . . . .	142
5.6	Conclusion . . . . .	146
	<b>Conclusion générale</b>	<b>148</b>
<b>A</b>	<b>Preuve de la proposition 2.1</b>	<b>154</b>

**B Preuve de la proposition 4.4**

**160**

# Table des figures

2.1	Coût marginal de dépollution . . . . .	51
2.2	Auto-sélection des firmes en trois types . . . . .	72
2.3	Fonction linéaire par morceaux. <i>Source</i> : R&S p.199 . . . . .	73
2.4	Fonction en escalier. <i>Source</i> : R&S p.199 . . . . .	73
2.5	Fonction de paiement. <i>Source</i> : R&S p.200 . . . . .	74
2.6	<i>Relation entre <math>x^*(\theta)</math> et <math>\hat{x}(\theta)</math>. Source : R&amp;S p.201</i> . . . . .	77
2.7	<i>Duplication de la fonction du dommage marginal par <math>s</math> et <math>t</math></i> . . . . .	78
3.1	Optima en fonction du permis :	
	i) la fonction de transfert est non linéaire,	
	ii) $t_{z_i^+} = 0$ si $z_i = 0$ ,	
	iii) $t_{z_i^+} > 0$ si $z_i > 0$ ,	
	iv) $t_{z_i^+} < 0$ si $z_i < 0$ avec $ t_{z_i^+}  >  t_{z_i^-} $ . . . . .	90
3.2	<i>Duplication du dommage marginal par la fonction de transfert <math>t(z)</math></i> . . . . .	94
4.1	<i>Coût marginal de dépollution avec <math>l_h &gt; l_b</math></i> . . . . .	106
5.1	Incitation à l'adoption de la technologie propre lorsque la pollution est régulée par la taxe . . . . .	128
5.2	Incitation à adopter la technologie propre lorsque la pollution est régulée par des permis : diffusion partielle de la technologie . . . . .	131
5.3	Incitation à adopter la technologie propre lorsque la pollution est régulée par des permis : diffusion complète de la technologie . . . . .	132
5.4	Incitation à l'adoption de la technologie propre lorsque la pollution est régulée par la taxe . . . . .	134
5.5	Incitation à l'adoption de la technologie propre lorsque la pollution est régulée par des permis . . . . .	135
5.6	Incitation à adopter la technologie propre lorsque la pollution est régulée par une combinaison permis-subsvention . . . . .	136
5.7	Incitation à adopter la technologie propre lorsque la pollution est régulée par la taxe .	138
5.8	Incitation à adopter la technologie propre lorsque la pollution est régulée par des permis	139

5.9	Incitation à adopter la technologie propre lorsque la pollution est régulée par une combinaison permis-subsvention . . . . .	141
5.10	Incitation à l'adoption de la technologie propre lorsque la pollution est régulée par la taxe . . . . .	142
5.11	Incitation à l'adoption de nouvelle technologie lorsque la pollution est régulée par les permis . . . . .	143
5.12	Incitation à l'adoption de la technologie propre lorsque la pollution est régulée par une combinaison permis-subsvention . . . . .	145
5.13	Incitation au changement technologique lorsque le coût de dépollution de la firme est imparfaitement connu du régulateur . . . . .	146

# Introduction générale

La pollution est considérée dans la théorie néoclassique comme une défaillance du marché. Sa présence empêche l'utilisation optimale des ressources environnementales. L'intensification d'une activité économique tend à aggraver les effets négatifs de la pollution en raison de l'augmentation des quantités de polluants rejetées dans l'environnement. Dans son rapport, le GIEC<sup>1</sup> constate qu'entre 1970 et 2004, les émissions de gaz à effet de serre (GES) imputables aux activités humaines ont augmenté de 70% tandis que les rejets annuels de  $CO_2$  - principalement GES anthropique - ont progressé d'environ 80 %, soit 77 % des émissions totales de GES anthropiques en 2004. Le taux d'augmentation des émissions d'équivalent  $CO_2$  a été bien plus élevé pour la période 1995-2004 que pour l'intervalle 1970-1994. La plus forte augmentation des émissions de GES survenue entre 1970 et 2004 est en partie imputable à l'approvisionnement énergétique (25.9% ), aux transports (13.1%) et à l'industrie (19.4%). La hausse des émissions de GES issues des bâtiments à usage résidentiel et commercial, de la foresterie et de l'agriculture s'est faite de façon plus progressive (resp. 7.9%, 17.4% et 13.5%).

Depuis les années 70, l'intérêt octroyé à l'environnement n'a cessé de se développer dans les pays industrialisés en réaction à l'augmentation de la pollution. Ce constat a conduit Grossman et Krueger (1995) à mettre en évidence l'existence d'une courbe en U inversé, représentant la relation entre les émissions de polluants et le niveau de revenu par habitant dans le cadre spécifique de la pollution urbaine de l'air. Même si ce résultat, limité à cer-

---

1. La contribution des différents secteurs aux émissions totales de gaz à effet de serre anthropiques concerne l'année 2004 et a été publiée dans le rapport de synthèse du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), 2008.

tains polluants aux effets localisés, est théoriquement contestable (Damian et Graz, 2001), le dernier sondage d'opinion Eurobarometer (2009)<sup>1</sup>, montre que 63% des européens estiment que le changement climatique est un « *problème très grave* ».

En présentant des caractéristiques similaires à celles d'un bien public, la pollution n'est souvent pas prise en compte dans les coûts des pollueurs. En outre, en raison de l'absence de droits de propriété sur les biens pollués, la résolution de ce problème entre émetteurs et récepteurs dans le but d'internaliser la pollution n'est pas possible. Dès lors, c'est au régulateur que revient la responsabilité d'intervenir, notamment à l'aide des politiques environnementales, afin d'atténuer l'ampleur de ce problème et de répondre aux attentes des citoyens de plus en plus soucieux de la préservation de l'environnement.

La politique environnementale se définit comme la mise en œuvre d'instruments réglementaires et incitatifs visant à atteindre un objectif environnemental donné. Atteindre un niveau de pollution zéro n'est pas un but en soi. En effet, l'efficacité économique requiert que le niveau objectif soit celui qui égalise le dommage marginal au bénéfice marginal. La réglementation de type *command and control* est la plus répandue. Cet instrument consiste pour le régulateur à fixer des limites d'émission de polluant que les émetteurs doivent respecter. La directive européenne nitrate 91/676/CEE en est un exemple. Cependant, depuis plusieurs années, l'efficacité de la réglementation est l'objet de plusieurs critiques. Sont notamment évoqués le niveau élevé des coûts d'information occasionnés par l'application de cet instrument, la non satisfaction du principe d'équimarginalité des coûts marginaux de dépollution ou encore le manque d'incitation de cet outil au changement technologique en faveur de l'environnement.

À la différence des instruments réglementaires qui permettent peu de souplesse à atteindre l'objectif de dépollution, on constate, depuis quelques années déjà, une tendance de plus en plus forte à employer des instruments de nature incitative. Par l'application de ces instruments, dits économiques,

---

1. Sondage commandé par le Parlement Européen et la Commission Européenne.

le régulateur cherche à atteindre le niveau d'émission objectif tout en incitant les firmes à exploiter les opportunités de réduction des émissions au coût le plus faible. Ainsi, ils deviennent économiquement plus efficaces (Tietenberg, 1985, 1995; Baumol et Oates, 1988).

Un instrument économique désigne principalement la taxe ou les permis. Le premier, conçu par Pigou (1920), consiste à appliquer une taxe, positive ou négative, sur les émissions de polluants. Le second, fondé sur les critiques du premier par Coase (1960), repose sur la mise en place d'un marché de permis d'émission où les émetteurs peuvent acheter des permis auprès du régulateur.

Théoriquement, en situation d'information parfaite, la régulation des émissions par la taxe et par le marché de permis est équivalente. Ces deux instruments agissent de façon identique sur le comportement des firmes afin de les conduire à atteindre un niveau équivalent d'émission. En effet, pour atteindre un niveau d'émission quelconque, le régulateur peut soumettre les émissions à un taux de taxe correspondant à ce niveau d'émission. De même, proposer une quantité de permis équivalente au niveau d'émission désiré puis laisser les firmes se les échanger sur un marché, permet d'atteindre le même niveau. Le prix d'équilibre du permis est tel que l'offre du régulateur en permis, équivalente au niveau d'émission objectif, est égale à la demande de permis par les firmes. Ce prix est égal au taux de la taxe nécessaire pour implémenter le niveau d'émission objectif. Les deux instruments sont équivalents en terme d'efficacité économique et environnementale lorsque l'information sur les coûts de dépollution est parfaite (Cropper et Oates, 1992).

L'équivalence entre la régulation de la pollution par une taxe et par des permis, en termes d'incitation à aboutir au même niveau d'émission, est un point important. Toutefois, cette équivalence n'est pas souvent vérifiée. Plusieurs arguments peuvent alors entrer en compte pour favoriser l'un ou l'autre de ces outils tels que : la compétitivité des firmes, les effets distributifs de ressources collectées, l'incertitude sur les coûts de dépollution, l'incitation au changement technologique et l'antisélection. Dans cette thèse, nous nous intéressons plus particulièrement aux trois derniers arguments exposés.

## Effet d'incertitude

L'incertitude est une question primordiale qu'il faut prendre en compte pour être capable de trancher dans le choix des outils à adopter dans la régulation des émissions. Nous distinguons, globalement, incertitude de type scientifique et incertitude informationnel. La première résulte d'une connaissance scientifique insuffisante des caractéristiques de la pollution telles que son état, son ampleur et le rythme de son évolution. Des efforts considérables ont été déployés pour réduire ce type d'incertitude. Toutefois certains changements non linéaires de l'environnement, comme les catastrophes, demeurent encore difficilement prédictibles. Cette incertitude peut influencer sur les politiques de régulation de pollution à long terme, mais elle n'empêche pas les décideurs d'arriver à un accord sur un niveau d'émission donné sans attendre des certitudes sur le niveau optimal qui ne seraient pas possible. Ce type d'incertitude, communément partagé par régulateur et firmes, ne fait pas l'objet de cette thèse. Cependant, nous retenons que l'incertitude informationnelle résultant de l'asymétrie d'information qui existe entre l'information dont dispose le régulateur et celle dont disposent les firmes à propos des coûts et/ou bénéfices de dépollution. Si nous supposons que les bénéfices de dépollution sont communément connus, l'incertitude concerne, alors, uniquement les coûts de dépollution.

Lorsque le régulateur ne peut pas parfaitement observer les coûts de dépollution, celui-ci est placé dans une situation d'incertitude vis-à-vis de l'estimation des coûts de dépollution des firmes. Cette position l'empêche de prédire avec certitude le niveau de pollution à atteindre en réponse au prix d'émission préalablement fixé.

En présence d'incertitude ou exactement d'asymétrie d'information quant à la réaction des firmes au prix d'émission prévu par la politique environnementale, le régulateur n'est pas en mesure de prédire sans erreur possible le niveau de pollution à atteindre. Ainsi, les instruments classiquement utilisés pour réguler la pollution en information parfaite, tels que les taxes et les permis, ne peuvent pas être préconisés et le recours à un système hybride taxe-permis sera moins risqué.

## Effet de l'antisélection ou de différenciation

L'incertitude sur le coût de dépollution ne doit pas être confondue avec le problème d'antisélection qui est aussi un problème d'asymétrie d'information. Dans le premier cas, le régulateur risque de commettre des erreurs d'estimation du coût agrégé de toutes les firmes d'un secteur d'activité donné. Par conséquent, le prix (un seul) d'émission qu'il aura fixé n'entraînera pas la réduction attendue des émissions. En revanche, dans le cas de l'antisélection, le problème d'estimation du coût de dépollution agrégé ne se pose pas car le régulateur connaît parfaitement les coûts de dépollution de toutes les firmes du secteur. Toutefois, celui-ci fait face à une asymétrie d'information relative au "type" de la firme. En effet, à secteur d'activité donné, le régulateur ne sait pas quel coût correspondant à quelle firme. Par conséquent, la question de l'antisélection ne se poserait pas dans la mesure où celui-ci choisit de réguler la pollution à l'aide d'un prix linéaire, en l'occurrence le prix d'équilibre des permis.

Théoriquement, si le régulateur n'est pas en mesure de distinguer les firmes selon leur coût de dépollution, une régulation de premier rang risque de ne pas intéresser toutes les firmes. Seules les firmes avec un coût de dépollution élevé seraient intéressées par l'achat de permis (Akerlof, 1970). Ainsi, l'antisélection peut menacer l'existence même du marché des permis.

Nous proposons dans ce travail une politique de régulation de la pollution basée sur la différenciation des prix de permis d'émission. Cette politique pourrait intéresser un régulateur faisant face à un problème d'antisélection et cherchant, d'une part, à rallier toutes les firmes, chacune à sa capacité, à son objectif de dépollution, d'autre part, à s'accaparer un maximum de surplus issu de la vente des permis aux firmes. En établissant un parallèle avec les travaux de Rothschild et Stiglitz (1976), la différenciation des prix de permis, que nous soutenons ici, est privilégiée si elle donne lieu à un équilibre séparableur.

## Effet de changement technologique

Les taxes ou la mise en place d'un marché de permis sont des outils qu'utilise le régulateur afin de réparer les dommages causés par les émissions de pollution. Or, il serait préférable d'éviter un tel dommage par une réduction de la pollution en amont plutôt que par traitement en aval. De plus, la mise en place de ces outils n'est pas toujours facile, et ce pour plusieurs raisons. Tout d'abord, il devient de plus en plus difficile pour certains pays d'honorer leur engagements en matière de réduction des émissions sans entacher la compétitivité de leurs firmes uniquement à l'aide des taxes ou d'échange des permis. Par ailleurs, la réalisation des objectifs d'émission par l'échange des permis sur un marché international serait stratégiquement difficile pour certains pays, notamment les États-Unis, qui sont potentiellement demandeurs de permis et qui ne pourraient accepter de faire des transferts d'argent en échange des permis émis en Russie. Enfin, l'incitation au changement technologique permet non seulement d'être conforme aux règlements environnementaux mais permet également de développer des technologies de réduction d'émission durables tout en soutenant la compétitivité des firmes. Ainsi, l'effet sur le changement technologique peut aussi être un critère de comparaison de l'efficacité d'un outil de régulation des émissions de la pollution. Plusieurs chercheurs, tels que Jung *et al.* (1996); Milliman et Prince (1989); Requate et Unold (2003) ont essayé de classer les instruments de régulation de pollution en fonction du degré d'incitation au changement technologique engendré. Ces auteurs montrent que les taxes procurent des incitations plus fortes que les permis d'émission négociables, dans la situation où le régulateur est myope et connaît parfaitement le coût de dépollution des firmes. Cependant, en pratique, les coûts d'abattement sont plus ou moins bien connus des émetteurs eux-mêmes et encore moins bien connus du régulateur en raison de l'incertitude et de l'asymétrie d'information. L'équivalence entre les deux instruments n'est plus vérifiée (Weitzman, 1974). Ainsi, sous cette hypothèse, fixer un objectif consistant à atteindre le niveau d'émission optimal est absurde.

En situation d'information imparfaite, nous considérons que l'amélioration de l'efficacité de lutte contre la pollution se fait essentiellement par l'atténuation du manque d'informations chez le régulateur qui, logiquement,

peut se faire de deux façons différentes. Soit la politique est rendue moins dépendante de ces informations en privilégiant les instruments permettant d'atténuer les conséquences d'une éventuelle mauvaise estimation du coût de dépollution, soit les émetteurs sont incités à fournir un maximum d'informations possible sur leurs caractéristiques. L'incitation de l'instrument au changement technologique est un atout.

C'est dans cette logique que notre problématique cherche à proposer des solutions alternatives aux instruments classiques de régulation de la pollution. La présente thèse doit contribuer à l'amélioration de l'efficacité du contrôle de la pollution. Les questions abordées dans ce travail ne sont pas nouvelles, de nombreux chercheurs ont tenté d'y répondre. Toutefois, ces questions restent toujours d'actualité et sont loin d'avoir obtenues toutes les réponses attendues. Nous abordons principalement trois points. Tout d'abord, nous traitons de l'efficacité de l'instrument hybride taxe-permis à réduire la pollution lorsque le régulateur connaît mal les coûts de dépollution. Cet instrument a été proposé par Roberts et Spence (1976) à partir des résultats de Weitzman (1974) et adapté par la suite à la régulation des émissions de GES par Pizer (1999) et Courneade et Gastaldo (2002). Ensuite, nous étudions la régulation de la pollution lorsque le régulateur fait face au problème d'antisélection. Nous différencions les prix des permis dans le but de réguler la pollution à un coût minimum et nous analysons également l'impact d'une telle différenciation du prix des permis sur la réduction de la pollution. Enfin, nous nous appuyons sur l'article de Requate et Unold (2003) pour essayer d'établir un classement des instruments économiques étudiés dans cette thèse en fonction de leur capacité à inciter l'adoption de technologies propres. Ce classement est réalisé à l'aide d'une analyse graphique, en situation d'incertitude sur le coût de dépollution.

### **Organisation de la thèse**

Nous commençons cette thèse par une revue critique de la littérature abordant la régulation de pollution en situation d'incertitude sur les coûts

et/ou les dommages de dépollution. À travers cette étude, nous tenons à mettre en évidence l'intérêt des solutions que nous défendons. Cette thèse est ainsi constituée de **cinq chapitres**.

**Le premier chapitre** présente en détail la problématique de la thèse et fait le point sur l'efficacité des différents instruments de régulation de la politique. La première section est consacrée à un rappel de l'objectif optimal de la politique environnementale ainsi qu'à un bref aperçu des différents outils de régulation en fonction des caractéristiques de la pollution et de la disponibilité des informations sur les firmes.

Dans la deuxième section, nous rappelons le fondement théorique du principe polluer payeur avant d'évoquer les défaillances de marché dans la régulation de la pollution. Nous analyserons dans la section 1.3 la substituabilité de la taxe et l'échange des permis en situation d'information parfaite. Appliquée aux émissions polluantes, la taxe repose sur un mécanisme de prix qui permet au régulateur de décentraliser la gestion de la pollution. L'annonce d'un système de prix incite chaque pollueur à émettre le niveau d'émission espéré par le régulateur sans avoir besoin de fixer un objectif quantitatif d'émission. Cependant, le régulateur peut directement émettre sur le marché un nombre de permis équivalent au niveau d'émission désiré. Confronté à la demande des firmes, le prix d'équilibre qui émerge est égal au montant de la taxe dans la situation où la régulation de pollution avait été faite à l'aide d'une taxe.

Dans la quatrième section, nous verrons que les instruments classiques de régulation de pollution, notamment les taxes et les permis ne peuvent pas être recommandés pour réguler la pollution diffuse. Nous exposerons brièvement les concepts de taxe sur les intrants et taxe ambiante présentées, sous certaines hypothèses, comme substituts aux taxes et permis d'émission. Ces hypothèses, qui ne sont vérifiables en pratique que pour certains cas d'émission isolés, ne suffisent pas pour généraliser l'emploi de ces instruments.

En l'absence d'information parfaite sur les caractéristiques des émetteurs, divers travaux (Roberts et Spence, 1976; Pizer, 1999; Courneade et Gastaldo,

2002) recommandent l'utilisation de l'instrument hybride taxe-permis. Ce dernier apparaît plus efficace que les instruments constitués d'un pur type (taxe ou permis) et particulièrement adapté au problème de contrôle de la pollution. En l'absence d'information parfaite, une taxe ne garantit pas la certitude d'atteindre le niveau d'abattement préalablement ciblé. En effet, la réaction des émetteurs à cette taxe est incertaine, alors que l'adoption d'approche par les permis apporte une certitude sur le niveau d'abattement à réaliser mais aucune certitude, en revanche, sur le prix d'équilibre qui en ressort. La taxe est un outil qui est plus réversible que le permis. Elle permet au régulateur de revoir ses taux d'imposition par tâtonnement afin d'atteindre le niveau voulu. Au contraire, le permis est vu comme un droit de propriété dont l'échange n'implique *a priori* que les émetteurs. Une fois alloués, il est donc difficile d'agir sur le prix de ces permis sans prévoir un système de compensation.

Le **deuxième chapitre** a pour objet principal l'analyse formelle de la régulation des émissions en situation d'incertitude sur les coûts ou sur les dommages marginaux. Cette analyse est menée dans le but de mettre en évidence les critères de choix d'instrument de régulation lorsque les coûts sont incertains ainsi qu'à présenter la solution de Roberts et Spence (1976) comme alternative à l'application de la taxe ou des permis seuls.

Nous commençons dans la première section par un rappel du cas classique de la régulation des émissions par une taxe et des permis lorsque l'information est parfaite. Les autres sections seront consacrées aux contributions majeures qui ont ouvert la voie à une possible combinaison de la taxe et du marché de permis. La section 2.2 présente l'article de Weitzman (1974) qui est devenu célèbre par son résultat original. L'auteur montre qu'une taxe est préférable si la pente en valeur absolue du coût marginal est supérieure à la pente du bénéfice marginal. Dans le cas inverse, un système de permis doit être choisi. De par ce résultat, Weitzman conçoit un critère de choix entre un instrument prix et un instrument quantité en situation d'incertitude sur les coûts et les dommages. Ainsi, dans le cas des GES, une régulation par la taxe est préconisée car l'impact des émissions dépend davantage du stock dans l'atmosphère que du flux d'émission.

Dans la section 2.3, nous proposons d'étudier le système hybride introduit par Roberts et Spence (1976). Cet instrument permet d'associer les avantages liés à l'échange de permis à polluer avec les incitations à économiser que peut générer la taxe. Selon cet instrument, le régulateur fixe *ex-ante* la quantité de permis qui n'est pas nécessairement optimale (à cause de l'erreur d'estimation du coût de dépollution) et la met en vente sur un marché de permis supposé concurrentiel. En réaction à l'offre du régulateur, les firmes déterminent leur demande et leur disponibilité à payer pour l'achat de ces permis. À l'équilibre, si la quantité de permis offerte correspond exactement à la quantité demandée, alors ce système revient à un système de permis d'émission. Si l'offre s'avère supérieure à la demande, le régulateur propose de racheter les permis non utilisés à une subvention de taux inférieur au prix d'achat des permis. Au contraire, si l'offre est inférieure à la demande, alors le régulateur autorise les firmes à polluer en contrepartie d'une taxe à un taux supérieur au prix des permis.

En approximant la fonction de dommage à l'aide d'une fonction linéaire par morceaux, l'instrument hybride taxe-permis est économiquement plus efficace qu'un instrument pure taxe ou pur permis car il réduit l'incertitude sur le coût de dépollution. Il a été présenté ces deux dernières décennies comme l'instrument à la fois efficace et politiquement acceptable notamment en Europe dont la politique environnementale est fondée essentiellement sur la taxe.

Dans le système de Roberts et Spence, la fonction de transfert vers le régulateur est considérée linéaire dans la demande et l'offre de permis émis. Par conséquent, cette fonction ne permet d'approximer la fonction de dommage, supposée convexe, que par une fonction linéaire par morceaux. Les taux de la taxe et de la subvention sont supposés fixes mais différents.

Nous étendons dans le **troisième chapitre** le travail de Roberts et Spence (1976) en dépassant leur cadre d'analyse. Nous considérons une fonction de transfert monétaire non linéaire entre le régulateur et les firmes dans les demandes nettes de permis à polluer. Cette fonction de transfert ne dépend pas des différents types de firmes, c'est-à-dire de leurs coûts d'abatte-

ment, qui ne sont pas observables, mais duplique la fonction de dommage social estimée. La fonction de transfert que l'on obtient ainsi est convexe, tout comme la fonction de dommage social.

Notons que le monopole de la vente des permis par le régulateur ne pose pas de problème à l'obtention d'une solution optimale (si elle existe) puisque les firmes choisissent optimalement le niveau initial de leurs dotations. Toutefois, l'hypothèse qui consiste à supposer que le taux du transfert monétaire entre la firme et le régulateur est asymétrique peut être discutée car elle limite la forme de la fonction du transfert approximant la fonction du dommage.

Dans les deux chapitres précédents, le régulateur est mis dans une situation où il peut commettre des erreurs d'estimation en raison de sa méconnaissance du coût de dépollution agrégé. Dans le **quatrième chapitre**, nous passons à une situation où le régulateur connaît parfaitement ce coût mais fait face à un problème d'antisélection, c'est-à-dire qu'il n'est pas en mesure de distinguer les firmes par leur coût marginal de dépollution.

Afin de remédier à ce problème, nous suivons Rothschild et Stiglitz (1976) et développons un système incitant la firme à révéler son véritable coût. Pour ce faire, le régulateur propose un menu de contrats à la firme, avec pour chaque quantité de permis d'émission un prix payé ou reçu par celle-ci. Par le biais de ce menu, le régulateur cherche à minimiser à la fois le coût de dépollution et la rente informationnelle, maximiser son surplus et atteindre le niveau d'émission désiré. En réaction, les firmes choisissent leur contrat en fonction de la structure de leur coût de dépollution sachant qu'elles peuvent supporter un coût de dépollution interne et s'abstenir d'acheter des permis. Ainsi, les prix optimaux des permis dépendront de l'élasticité de la demande des firmes.

La formalisation du système que nous proposons diffère de celle du Rothschild et Stiglitz (1976) par deux points capitaux. Le premier concerne l'asymétrie d'information qui, dans notre modèle, porte sur la structure du coût et non pas sur les risques. Le deuxième a trait aux contraintes de participation qui sont généralement prévues pour inciter l'Agent à préférer le contrat du Principal aux autres opportunités qui lui seront proposées. Dans le contexte environnemental qui nous intéresse, nous supposons que les firmes doivent

internaliser le coût de leurs émissions pour continuer à produire. Ainsi, aucune contrainte de participation n'est prévue.

À long terme, une politique centralisée de réduction de pollution par des taxes et/ou des permis peut avoir des conséquences défavorables sur la compétitivité. En effet, certains secteurs d'activité sont très exposés à la concurrence d'émetteurs de pays étrangers où le respect de l'environnement n'est pas une priorité. Cet argument a été clairement affiché par le président Nicolas Sarkozy lorsqu'il a conditionné la taxe carbone à une taxe européenne aux frontières en déclarant que « *le dumping environnemental menace nos emplois. Il serait absurde de taxer les entreprises françaises en donnant un avantage compétitif aux entreprises des pays pollueurs* »<sup>1</sup>. Ainsi, contrairement à ce que nous avons vu dans les chapitres précédents où la dépollution est accompagnée d'une réduction de production, il est aussi important d'inciter à l'innovation qui, tout en permettant aux émetteurs de se conformer aux exigences de la politique environnementale, leur permet de maintenir leur production et d'améliorer leur compétitivité grâce à des investissements dans des technologies propres, ceci constituera l'objet du **cinquième chapitre**. Nous étudions dans ce chapitre l'impact de l'incertitude concernant le coût de dépollution sur l'incitation au changement technologique. Ainsi, nous nous intéresserons aux incitations engendrées par la taxe, le permis et le système hybride en situation d'incertitude sur le coût de dépollution. Cette incitation est mesurée par les gains additionnels réalisés sur le prix et le volume d'émission occasionnés par l'adoption de la technologie propre.

Nous commençons par exposer le cadre général du modèle et les hypothèses qui serviront à comparer l'incitation au changement technologique (section 5.2). Nous nous appuyons sur le modèle de Requate et Unold (2003) dont les résultats sont exposés dans la section (5.3). Ces auteurs montrent que si le régulateur est myope et connaît parfaitement les coûts de dépollution, alors la taxe fournit une incitation au changement technologique plus forte que l'échange de permis. En fait, pour un coût donné d'acquisition de technologies propres, l'adoption de celles-ci permet de baisser le prix des permis sans pour autant réduire les émissions de la pollution au-deçà du niveau à at-

---

1. Le Parisien 24-03-2010

teindre. En revanche, au même coût, la régulation par la taxe incite à réduire davantage d'émissions puisque dans ce cas l'échange d'économie d'émission entre les firmes n'est pas possible.

Comme nous l'avons évoqué plus haut, le régulateur est souvent appelé à concevoir la politique de régulation de pollution en situation d'incertitude sur le coût de dépollution. Ainsi, nous retenons dans les sections (5.4 et 5.5), comme dans Requate et Unold (2003), l'hypothèse que le régulateur est myope. Par ailleurs, nous supposons que le régulateur risque de mal estimer le coût de dépollution agrégé en raison de l'incertitude sur celui-ci. Cette incertitude est prise en compte dans notre analyse graphique sur l'incitation au changement technologique lorsque nous nous intéressons au système hybride taxe-transfert. Ce système s'avère plus efficace dans une telle situation, comme nous l'avons vu dans les chapitres (2 et 3). Lorsque le régulateur sous estime le coût de dépollution, nous distinguons deux cas de figure. Le premier traite de l'adoption d'une technologie issue d'une innovation radicale qui aura comme effet l'annulation de l'erreur de l'estimation du coût. Le deuxième discute de l'adoption d'une technologie produite suite à une innovation incrémentale dont l'effet sur le coût ne peut pas compenser l'effet de sous estimation de celui-ci

# Chapitre 1

## ÉTAT DE LA QUESTION ET PROBLÉMATIQUE

### 1.1 Pollution : définition et caractéristiques

La pollution est définie comme toute *[dégradation de l'environnement par des substances (naturelles, chimiques ou radioactives), des déchets (ménagers ou industriels) ou des nuisances diverses (sonores, lumineuses, thermiques, biologiques.)*. Bien qu'elle puisse avoir une origine entièrement naturelle (éruption volcanique, par exemple), elle est principalement liée aux activités humaines], (dictionnaire Larousse). Elle se matérialise par l'apparition d'effets indésirables n'étant pas naturellement présents dans un milieu donné. Elle peut être qualifiée par rapport à la nature du polluant, (exemple de la pollution sonore), ou par rapport à l'endroit pollué, (exemple de la pollution atmosphérique).

#### 1.1.1 Objectif « zéro pollution » n'est pas socialement souhaitable

Comme toute externalité, la pollution est vue comme la conséquence de l'absence de prix de certaines ressources environnementales (l'air et l'eau par exemple). En réponse à ce manque, les économistes préconisent des solutions qui consistent à introduire des prix de remplacement sous forme de taxe ou

de prix de permis pour inciter à l'utilisation efficace de ces ressources.

Le marché permet de réguler l'économie en confrontant en permanence les préférences des producteurs et celles des consommateurs. Il reste par conséquent un mécanisme privilégié pour rationaliser l'utilisation des ressources économiques en rapprochant le juste prix de l'allocation optimale de ces ressources. Cependant, faute d'une définition exacte de la propriété d'usage de certains biens environnementaux, les émissions de produits polluants tendent à dépasser le niveau socialement optimal. En effet, les firmes sous-estiment généralement le véritable coût de production des biens polluants. Ainsi, la pollution échappant à toutes formes de marché, l'évaluation et l'attribution de prix aux biens environnementaux n'est pas envisageable (Baumol et Oates, 1988). Pour corriger cette « défaillance », l'État est souvent sollicité de la même manière qu'il l'est déjà lorsqu'il s'agit de la production d'un bien public ou la réglementation d'un monopole naturel.

Les biens d'environnement comme l'air et l'eau sont souvent assimilables à des biens publics. Ils sont la propriété collective de tout le monde mais sans qu'ils ne soient la propriété individuelle d'aucun. Ces biens vérifient au moins une des deux conditions caractéristiques du bien public, à savoir : i) sa consommation (ou utilisation) est forcément accessible pour tous (non excluable) et ii) indivisible (principe de non rivalité)(Samuelson (1954), Dales (1968)). Ainsi, le bénéfice d'un environnement non pollué est mal conçu par les agents privés ce qui encourage souvent la surexploitation de ces biens.

Comme pour tout bien public, le financement de l'effort de lutte contre la pollution se heurte au problème du passager clandestin<sup>1</sup>. Ce comportement peut empêcher l'attribution d'une valeur marchande à ces biens environnementaux et, par conséquent, l'émergence de marché.

Face à cette situation, le régulateur intervient afin d'amener les agents à modifier leurs comportements, dans le but de diminuer la pollution à un

---

1. Individu dont l'intérêt est que les autres fassent collectivement une action à laquelle il ne participe pas à titre individuel mais dont il profite pleinement.

niveau préalablement défini et considéré comme socialement acceptable par celui-ci.

Si tout le monde s'accorde sur la nécessité de corriger les effets négatifs de la pollution, le niveau de pollution zéro n'est pas toujours souhaitable, pour plusieurs raisons. En effet, en deçà d'un certain seuil, la pollution peut être assimilée par l'écosystème ou par l'utilisation d'une technologie spécifique et être amenée à un niveau toléré. De plus, la société peut admettre un niveau minimal de pollution, afin d'accroître le bien-être social : les effets négatifs de la pollution peuvent être compensés par les bénéfices tirés du fait de polluer. Toutefois, individuellement, aucun agent n'accepte de subir les effets de la pollution gratuitement.

Au niveau de la société, tant que la pollution n'a pas d'effets irréversibles, le niveau de la pollution zéro n'est pas un objectif en soi. Cet objectif est délaissé au profit d'un niveau de pollution considéré comme socialement optimal, issu d'un calcul en termes de coût-avantage.

En tenant compte de tous les effets externes, positifs ou négatifs, de l'activité polluante sur la société, le niveau socialement optimal est obtenu en maximisant les bénéfices totaux nets des coûts totaux. Au-delà de ce niveau, le coût marginal de la pollution devrait excéder le bénéfice marginal et par conséquent la société n'aura plus intérêt à tolérer davantage de pollution. Ce niveau est différent du niveau d'émission optimal de la firme qui ne tient compte que de son propre coût privé.

Ainsi, si le régulateur est omniscient, (section 1.3), il incite les firmes à ne pas dépasser ce niveau d'émission socialement optimal. Or, les firmes sont seules à connaître leur coût privé et ne sont pas prêtes à le révéler gratuitement. L'acquisition de cette information ne peut se faire qu'à un coût croissant, allant à l'encontre d'une solution efficace (on s'éloigne nécessairement de la solution de premier rang). Au contraire, le niveau d'émission de second rang est la meilleure solution que le régulateur peut espérer atteindre lorsque celui-ci ne peut avoir qu'une information partielle. Cette solution

plus réaliste nécessite pour le régulateur de prévoir un coût supplémentaire afin d'acquérir cette information. Nous traitons ce cas dans la section 1.4 avant d'y revenir ultérieurement dans les chapitres 3 et 4 qui étudient les instruments alternatifs de dépollution lorsque l'information est imparfaite ou incomplète.

### 1.1.2 À caractéristique différente, un outil de régulation différent

Selon les caractéristiques des émissions ou en fonction du type de firmes, la littérature relative à l'économie de l'environnement énumère plusieurs types de pollution. Ainsi, lorsque l'on se focalise sur la difficulté de traçabilité des émissions, la différence se fait entre les émissions dites de sources ponctuelles (PsP) et les émissions dites diffuses<sup>1</sup>. La première catégorie d'émissions proviennent des points d'émissions bien précis (lieux de décharge par exemple) et qui sont observables par le régulateur. Le second type d'émissions provient, quant à lui, de points éparpillés, difficilement identifiables et non observables, et où seule la pollution du milieu peut être constatée. la pollution des eaux par les activités d'élevage en est une illustration.

Concernant le critère dynamique et temporel des émissions, la littérature différencie plusieurs catégories d'émissions. Ainsi, on distingue les émissions courantes (d'une année) dites de flux, parfois assez faibles pour ne pas constituer un danger, des émissions de stock dont le dommage dépend de la concentration et l'accumulation du polluant dans le milieu ; la concentration des gaz à effet de serre (GES). La concentration des émissions de Chlorofluocarbure (*CFC*) appauvrissant la couche d'ozone et les émissions de métaux lourds en sont des exemples.

Enfin, nous pouvons encore différencier les émissions d'un petit nombre de grands émetteurs, comme les centrales électriques, des émissions de nom-

---

1. Nous utilisons le terme « diffuse » tout au long de cette thèse en tant qu'expression équivalente à celle de « la pollution de sources non ponctuelles (PsnP) » que l'on retrouve dans plusieurs références.

breux petits émetteurs domestiques. Mais de toutes ces différences, la littérature traite le plus souvent celles qui prévalent entre la pollution de sources ponctuelles (PsP) et la pollution de sources non ponctuelles (PsnP). En fait, le caractère diffus des émissions de la PsnP empêche l'utilisation des instruments traditionnellement conçus pour réguler les émissions de PsP. Cette situation a conduit les chercheurs à imaginer d'autres instruments tels que la taxe sur l'intrant, la taxe sur le sortant, la taxe ambiante ainsi qu'une combinaison taxe-permis (se reporter à la section 1.4).

Les émissions de pollution de sources ponctuelles, dont on peut identifier la source et éventuellement le responsable, sont directement et facilement mesurables. Elles sont étroitement liées au dommage qu'elles génèrent (Baumol et Oates, 1988). Ainsi, leur gestion ne pose pas de problème au régulateur puisqu'il peut inciter les firmes à limiter leurs émissions à l'aide d'un signal prix approprié.

À l'inverse, la pollution diffuse se caractérise par la difficulté de déduire l'impact causé par chaque agent dans la pollution collective, particulièrement s'ils sont nombreux. Sa nature rend coûteuse, voire impossible, une connaissance certaine de l'ensemble des agents réellement impliqués dans la pollution ainsi que l'ampleur des dégâts individuellement causés par chacun d'eux. C'est le cas notamment des pollutions non accidentelles qui naissent suite à un effet d'accumulation progressive du polluant dans le milieu. En outre, les émissions n'émanent pas de points bien connus comme dans le cas de la pollution ponctuelle mais de plusieurs sources parfois nombreuses et disséminées. De ce fait, la pollution observée dans le milieu contaminé est le résultat d'un effet d'accumulation du polluant depuis différents lieux d'émission. À titre d'exemple, la pollution de l'eau provient majoritairement des activités liées à l'agriculture (engrais, pesticides et produits vétérinaires) ou la pollution atmosphérique causée par les gaz issus de l'utilisation des combustibles fossiles.

Cependant, cette pollution ne dépend pas uniquement des émissions individuelles des pollueurs impliqués dans la pollution ou de la technologie utilisée pour la réduire. Plusieurs facteurs stochastiques, pédologiques, géologiques

et climatiques interviennent pour dévier le cours du polluant, modifier sa concentration et accélérer sa fuite vers ce milieu. Ainsi, la différence entre la quantité émise à la source et la quantité constatée dans le milieu contaminé peut être largement altérée par la composition des sols et la distance qui la sépare de la source du milieu, par exemple. L'hétérogénéité de distribution de ces facteurs naturels peut intervenir lors de l'acheminement naturel du polluant pour en augmenter ou en baisser la concentration. De ce fait, des agents qui émettent la même quantité de polluant peuvent contribuer différemment à la pollution du milieu, d'où la difficulté de résoudre la pollution diffuse.

Enfin, ces facteurs ne changent pas seulement d'un endroit à autre mais aussi dans le temps. L'efficacité de la politique environnementale à un moment donné ne peut ainsi être garantie *ex post* car elle reste tributaire des changements temporels de ces facteurs.

Si tous les économistes s'accordent sur la nécessité d'internaliser le coût de la pollution, ils divergent sur le principe et la façon par laquelle ce coût doit être internalisé. Mais avant de choisir les instruments de la régulation, il faut encore décider à qui les droits de l'environnement doivent être donnés : aux producteurs ou aux consommateurs ?<sup>1</sup>. Donner le droit d'usage de l'environnement aux victimes de la pollution est une application du principe pollueur-payeur. Ce principe a été avancé comme étant *a priori* moralement et politiquement acceptable, mais qu'en est-il de son efficacité ?

## 1.2 Efficacité du principe pollueur-payeur

Le régulateur intervient notamment pour imputer le coût externe de la pollution de l'activité de certaines catégories d'agents économiques. En appliquant le principe pollueur-payeur<sup>2</sup>, le régulateur fait payer le pollueur pour

---

1. Dans ce travail, producteur ou pollueur désigne la même catégorie d'agents, celle qui génère l'externalité. À l'opposé, consommateur, pollué ou victime sont des termes utilisés pour désigner la même catégorie d'agents : celle qui subit l'externalité.

2. C'est un principe qui a été adopté par l'OCDE en 1972, concrétisé en France dans la loi dite *Barnier* qui le définit comme « *Principe selon lequel les frais résultant des mesures*

le dommage qu'il a causé et peut vouloir redistribuer la somme collectée aux agents qui subissent l'externalité (victimes). Cependant, l'application de ce principe pose un problème de légitimité et d'efficacité du recyclage des sommes collectées.

En appliquant ce principe, chaque firme dont l'activité pollue va chercher à se procurer des droits à polluer ou à payer une taxe sur la pollution tant que le coût supporté à la marge reste inférieur à celui qu'induit l'adoption de mesures de dépollution. Si le prix des droits à polluer ou le montant de la taxe à payer augmente en fonction de la contrainte environnementale à respecter, alors l'optimum social peut être atteint.

Concernant plus particulièrement la taxe proposée par Pigou (1920), égale au dommage marginale, il est intéressant de noter qu'elle peut générer, dans certains cas, une augmentation du dommage. En effet, par application du principe de cette taxe, une firme qui émet, par exemple, de la fumée dans l'air devrait verser un dédommagement aux victimes qui subissent cette externalité. Or, cette entrée d'argent pourrait inciter d'autres victimes à s'installer près de la firme pollueuse. Le dommage total subi augmente alors et pousse mécaniquement la taxe à payer à la hausse. Cette firme ne pourra pas continuellement faire face à des dédommagements qui ne cessent d'augmenter et finira par disparaître. De ce fait, Coase (1960) affirme que la théorie pigouvienne ne propose pas un principe correct de taxation permettant d'internaliser l'externalité et ne cible pas non plus correctement les individus qui devraient être taxés. D'après Coase, les victimes pourraient aussi supporter une partie du coût d'internalisation de la pollution. En effet, étant socialement moins coûteux de garder les victimes potentielles loin de la firme pollueuse plutôt que de réduire la quantité de polluants émis par celle-ci, cette solution apparaît comme socialement plus souhaitable. De ce fait, bien qu'il soit moralement acceptable d'imputer le dommage de la pollution aux pollueurs en leur faisant payer une taxe proportionnelle à la pollution émise, le paiement de cette taxe peut constituer une charge socialement indésirable

---

*de prévention, de réduction de la pollution et de lutte contre celle-ci doivent être supportés par le pollueur* », Art 200-1 de la loi n° 95-101 du 2 février 1995.

telle qu'une atteinte à la concurrence, ou une entrave à l'émergence de certaines activités fortement polluantes (Baumol, 1972)), notamment lorsque cette situation coûte plus à la société qu'elle ne lui rapporte.

Nous avons généralement tendance à croire que seul Coase s'est préoccupé de la question de la définition du droit de propriété. Or, Pigou s'est également prononcé sur le droit de propriété, mais ce de manière implicite, dans la mesure où sa théorie attribue systématiquement la propriété de la nappe phréatique polluée par des agriculteurs, par exemple, aux victimes de la pollution et oblige par conséquent le pollueur à dépolluer. Cette systématisation, concrétisée par l'application du principe pollueur-payeur, a été vivement critiquée par Coase. Ce dernier soulève la fatalité de l'externalité en expliquant que si une externalité persiste c'est peut être parce qu'il n'est pas économiquement efficace d'intervenir pour la faire disparaître. L'application automatique et systématique du principe pollueur-payeur est une erreur si l'on ne connaît pas la valeur, censée refléter les préférences individuelles, que retire la société du fait d'infliger la taxe à telle ou telle partie.

Coase évoque ce point lorsqu'il écrit que « *[...] la réponse n'est pas évidente aussi longtemps que l'on ne connaîtra pas la valeur de ce qui est obtenu ainsi que la valeur de ce qui doit être sacrifié pour l'obtenir* » (1960, p.2). En fait, donner d'emblée la propriété d'un bien quelconque aux victimes n'est pas toujours économiquement efficace. De la même manière que laisser faire sans limite peut être pris par les pollueurs comme un octroi absolu et sans réserve du droit d'« abuser » de l'environnement. Par conséquent, les pollueurs ne prendront pas en compte dans leurs décisions de production ou de consommation le coût externe qu'ils infligent aux victimes. Le coût social augmente à un niveau où le laisser faire n'est plus efficace et devient par conséquent exclu. Ainsi, l'intervention du régulateur pour définir la propriété doit être guidée par l'efficacité économique.

Pour illustrer le raisonnement de Coase, nous reprenons l'exemple de la pollution de la nappe phréatique d'eau par les agriculteurs. La question serait, selon l'auteur, de comparer la valeur du dommage causé par les agriculteurs

au regard du produit agricole, qui sans émission de pollution, ne sera pas produit. Le choix devrait porter sur la situation qui rapporte plus de produit social net de dommage. Ainsi, il est préférable de faire payer la catégorie d'agents qui permet de valoriser plus ce produit social plutôt que de l'attribuer d'emblée à telle ou telle catégorie. En pratique, il est souvent difficile pour le régulateur de connaître cette valeur sociale. À défaut d'évaluer toutes les externalités, ce dernier se contente alors de faire primer la solution politique sur la solution économique.

Selon Coase, en l'absence de coûts de transaction et de comportements stratégiques et si les droits de propriété sont bien définis, les externalités seront internalisées sans l'intervention du régulateur<sup>1</sup>. Or, ces hypothèses sont plutôt fortes. L'externalité en question implique souvent de nombreux agents économiques et il devient alors difficile d'envisager des arrangements volontaires et sans coût. Par conséquent, sa solution pour réguler la pollution est peu réaliste dans de nombreux cas. Ainsi, Baumol (1972) ne partage pas le raisonnement de Coase et considère que la taxe à la Pigou est plutôt un instrument juste pour contrôler la pollution. Si on considère la question sous un autre angle, les émissions que subissent les victimes sont un mal collectif dont l'effet ne réduit pas celui subit par les autres (non rivalité). En conséquence, le dédommagement à verser à ces victimes est nul, exception faite pour des paiements des sommes forfaitaires quand les victimes s'engagent à mettre en œuvre des activités réduisant les effets de la pollution, et donc la compensation n'est alors pas nécessaire. Ainsi, pour atteindre un niveau de pollution optimal, il serait mieux, selon Baumol, de concevoir un prix « spécial » qui est la combinaison de la taxe pigouvienne et d'un prix nul pour les victimes, plutôt que de chercher un prix direct. En effet, un taux élevé réduira les émissions de la firme polluante à un niveau qui n'empêche pas l'installation d'autres victimes auprès d'elle. En revanche, un faible taux de taxe augmentera les émissions à un niveau décourageant plus de victimes à s'installer auprès de cette firme polluante.

---

1. Ce théorème a été nommé et formulé dans un premier temps par Stigler (1966) à partir des travaux de Coase avant que ce dernier en accepte la paternité.

Une taxe appropriée doit contrôler le niveau des émissions et le flux des victimes qui s'installent auprès de cette firme. Au contraire, une unique récompense au bénéfice des victimes pour les dommages qu'elles subissent, et qui croît au fur et à mesure que leur effectif augmente, est une incitation à s'installer près de la firme polluante, ce qui augmente de nouveau le dommage et ainsi de suite jusqu'à l'insolvabilité et l'arrêt d'activité de cette firme. Ainsi, pour maintenir le dommage à un niveau raisonnable (car plus le dommage à la marge est élevé plus la taxe à la marge l'est aussi), le régulateur devrait récompenser en premier lieu les victimes pour les dommages qu'elles ont subis, puis les faire payer pour les décourager de s'installer près de la firme polluante.

Le choix d'un instrument de régulation de la pollution est une question dominante de la recherche en économie de l'environnement. Il dépend de plusieurs facteurs socioéconomiques. En effet, certains instruments peuvent être difficiles à mettre en œuvre en raison de leur impact social, culturel ou encore économique tel que l'entrave à la compétitivité des firmes. Nous exposons dans la section suivante deux instruments économiques concurrents qui sont la taxe d'émission et les permis d'émission négociables (PEN). Chacun de ces outils a ses avantages, ses inconvénients et ses champs d'application privilégiés.

### 1.3 Régulation de la pollution en information complète

La politique environnementale peut être définie, de façon simplifiée, comme l'ensemble des instruments qui permettent d'atteindre un objectif de qualité environnementale préalablement défini. L'objectif le plus ambitieux attendu par un régulateur de pollution est d'atteindre la quantité d'émission socialement optimale. Or, pour des raisons que nous allons voir dans la section suivante (1.4), cet objectif ne peut être atteint lorsque les coûts d'abattement sont plus ou moins bien connus des firmes elles-mêmes, moins encore du régulateur. Dans ce cas d'asymétrie d'information, le régulateur peut choisir

d'abandonner cet objectif de premier rang au profit d'un niveau d'émission souvent fixé par le régulateur sur la base des négociations politiques et en fonction de l'information disponible à un certain coût.

Une large littérature a été consacrée à cette question. Cropper et Oates (1992) ont longuement détaillé le sujet dans leur survey (voir aussi Montgomery (1972), Tietenberg (1985), Baumol et Oates (1988) et Bontems et Rotillon (2007)). Dans ce sens, plusieurs instruments ont été explorés en vue d'une application au problème des externalités environnementales, notamment pour réguler les émissions polluantes. Ces instruments peuvent être classés en deux principales catégories selon qu'ils font appel à des moyens réglementaires ou économiques.

Le régulateur peut ainsi intervenir dans le cadre de sa politique environnementale via des moyens réglementaires. Il peut interdire ou limiter l'émission de certains polluants, particulièrement quand il juge que les coûts externes infligés à la société sont largement supérieurs aux avantages tirés de leur utilisation.

La réglementation<sup>1</sup> est souvent nécessaire dans les cas où il existe des seuils au-delà desquels les dommages causés ne peuvent être réparés, c'est en général le cas des substances dangereuses dont la production et/ou l'usage sont réglementés<sup>2</sup>. L'interdiction de la mise en vente d'appareils ménagers consommant trop d'énergie en est un autre exemple.

La norme, désignée en anglais par l'expression « *command and control* », agit par le biais de directives explicites sur le niveau de pollution limite ou sur les procédés à utiliser pour l'atteindre. Elle fait partie des instruments classiques par lesquels le régulateur cherche à atteindre le niveau d'émission souhaité sans prendre forcément en compte l'hétérogénéité des caractéris-

---

1. Normes d'émission, procédures d'autorisation administrative et licences d'exploitation.

2. C'est également le cas des 1500 substances les plus dangereuses parmi les 30.000 produits chimiques fabriqués, importés, exportés et consommés en Europe que répertorie le projet REACH (*Registration, Evaluation and Authorization of Chemicals*).

tiques des firmes. Ainsi, l'application de la norme, dans sa version uniforme, soumet toutes les firmes à la même contrainte quelque soit leur coût d'abattement et la technologie utilisée.

En théorie, l'objectif du premier rang peut tout de même être atteint si la réglementation est conçue dans sa version différenciée. Dans ce cas, le régulateur doit concevoir autant de normes qu'il y a de firmes existantes. Cette différenciation, qui demande une connaissance parfaite du coût d'abattement de chaque firme, est très coûteuse et son application n'est pas envisageable. Ces points étant précisés, cette section est essentiellement consacrée aux instruments incitatifs.

À côté de ces mesures « autoritaires », le régulateur peut aussi inciter les pollueurs à changer leur comportement dans le sens d'une réduction des émissions à un niveau socialement désirable.

Les instruments économiques<sup>1</sup> doivent inciter les firmes à internaliser le coût de la pollution par des signaux de marché plutôt que par des directives explicites sur le niveau de pollution à respecter. S'ils sont bien conçus, ces instruments encouragent les firmes à entreprendre les efforts d'abattement qui vont dans leurs propres intérêts et qui rencontrent collectivement les objectifs de la politique environnementale (Stavins, 2003; Jaffe *et al.*, 2002).

En théorie, ces instruments permettent d'atteindre, en l'absence de problème d'information, n'importe quel niveau d'abattement au coût social le plus faible. Ainsi, les firmes dont les activités génèrent plus d'émissions ne sont pas limitées par une norme uniforme mais uniquement par leurs coûts d'abattement croissants. Elles continuent à émettre de polluants jusqu'à ce que leurs coûts marginaux d'abattement égalisent le prix de l'adoption de l'instrument concerné (entre autres Montgomery (1972), Tietenberg (1985, 1995) et Baumol et Oates (1988) ). En outre, ces instruments incitent également à l'innovation et l'adoption de nouvelles technologies (Milliman et

---

1. Il existe une grande diversité d'instruments incitatifs (voir Baumol et Oates, 1988). Nous traitons principalement dans ce travail la taxe et le permis d'émission.

Prince (1989) et Stavins (1995)).

Ces incitations sont généralement provoquées par l'application de mesures ou d'instruments économiques principalement la taxe/subvention et l'échange de permis d'émission. Ces instruments consistent à faire payer le pollueur pour son excès d'émission de polluants et à le récompenser en cas de réduction. Leur présentation fait l'objet des sous-sections qui suivent.

### 1.3.1 Taxe et subvention

La taxe, introduite par Pigou (1920), est le plus ancien instrument économique utilisé pour contrôler la pollution. Elle se caractérise par le paiement d'un certain montant par unité de polluant rejeté dans l'environnement. Il est également possible de recourir à une « détaxation » (subvention) pour réduire les incitations à polluer. La taxe ou la subvention sont des instruments en prix puisqu'elles consistent à donner un prix aux émissions dans le but d'atteindre un niveau d'émission optimal. Elles sont souvent modélisées par un taux affectant le prix de production. Théoriquement, la taxe et la subvention sont deux instruments qui permettent d'aboutir à des allocations identiques dans le cadre d'un modèle de concurrence avec information parfaite (Chapitre 2, section 2.2). Toutefois, l'équivalence de ces deux instruments ne fait pas l'unanimité (Cropper et Oates, 1992), comme nous allons le voir tout de suite.

Le taux de la taxe doit être fixé de façon à inciter le pollueur à ne pas polluer au-delà d'un niveau jugé socialement optimal. L'idéal est que ce taux couvre le dommage marginal social et qu'il égalise le coût marginal social de sorte que la firme, en payant la taxe, internalise le coût de la pollution (Chapitre 2, sous-section 2.2.1). La firme a, en réalité, le choix entre payer la taxe ou dépolluer. Ainsi, elle dépolluera tant que son coût marginal de dépollution est inférieur au niveau de la taxe et paiera la taxe lorsque son coût marginal de dépollution y est supérieur<sup>1</sup>. Pour réguler la pollution, la

---

1. Toutefois, en cas de manque d'information sur le dommage ou le coût, le régulateur peut dévier de l'optimum de premier rang et fixer un niveau d'émission objectif à atteindre sans pour autant avoir la garantie de l'atteindre, faute de prévoir la réaction des firmes à ce taux de taxe (chapitre 2, section 2.3).

taxation est l'instrument le plus utilisé actuellement au niveau français et européen<sup>1</sup> (exemple : Taxe Intérieure sur les Produits Pétroliers, Taxe Générale sur les Activités Polluantes, taxe sur les achats d'engrais azotés).

En France, une taxe appelée « taxe carbone » a été prévue cette année pour compléter le système européen de quotas qui concerne les secteurs les plus intensifs en énergie et couvre 45% des émissions de dioxyde de carbone de l'UE. Cette taxe avait pour objectif de diviser les émissions de dioxyde de carbone de la France par quatre d'ici à 2050 (par rapport au niveau de 1990). Son prix a été fixé sur la base de 17 €<sup>2</sup> par tonne de dioxyde de carbone et porte sur le contenu en carbone des consommations d'énergies des ménages et des entreprises non assujetties au système de quotas. Pour compenser les effets indésirables de cette taxe sur le pouvoir d'achat des ménages et sur la compétitivité des firmes, son application avait prévu le versement total de cette taxe aux ménages ainsi que la suppression de la taxe professionnelle et l'exonération de certains secteurs, notamment, les transports, l'électricité, l'agriculture et la pêche. Finalement, le risque d'entraver la compétitivité des entreprises françaises est la raison qui a été évoqué le plus pour abandonner une fois pour toute cette taxe.

L'amélioration de la qualité de l'environnement par la réduction des émissions de polluants constitue le premier dividende de l'institution d'une taxe d'émission. Elle est l'objectif essentiel de l'application de cette taxe.

Cependant, une fois l'efficacité économique et environnementale assurées, les prélèvements fiscaux sur les rentes de pollution pourront générer un se-

---

1. L'Europe a plutôt une expérience modeste avec l'utilisation des taxes, notamment dans la gestion de la qualité de l'eau. À l'origine, les taxes ont été fixées pour collecter des fonds qui servaient à financer les projets de gestion de la qualité de l'eau et à alimenter la caisse de l'État et non pour contrôler directement la pollution. En France, il semble que la Taxe Parafiscale sur la Pollution Atmosphérique (TPPA) a été fixée pour procurer des recettes destinées à améliorer la qualité de l'aire que pour fournir un signal correct sur le coût marginal de l'abattement (Hauvuy et Riedinger, 2005). En revanche, l'Europe ne dispose d'aucune expérience des permis d'émission (voir Verchère, 2004).

2. Le rapport Rocard recommande, sur la base du rapport Quinet, une taxe de 32 €/t CO<sub>2</sub> en 2010 pour atteindre 100 €/t CO<sub>2</sub> en 2030. Pour plus de détail sur cette taxe, voir (Schubert, 2009).

cond dividende qui est l'amélioration du marché du travail et, dès lors, la réduction du chômage. Les recettes de la taxe pourront aussi conduire à la diminution d'autres taxes qui pèsent sur l'investissement, comme la taxe professionnelle en France. Il a été notamment question de la supprimer à terme pour que l'instauration de la taxe carbone se fasse à prélèvements constants pour les entreprises.

La taxe résulte d'une idée simple et efficace qui consiste à faire payer les firmes les dommages causés par leurs émissions de polluants. Son impact est différent d'un pays à l'autre mais, il est souvent considéré qu'un pays qui applique isolément cette taxation voit la compétitivité de ses firmes taxées diminuer. C'est pourquoi, dans plusieurs pays, la taxe est appliquée sur les produits utilisés par l'ensemble de la population<sup>1</sup>. De plus, parmi les membres de l'OCDE, seuls la Suède, la Finlande, les Pays-Bas, le Danemark, la Suisse, le Royaume-uni, l'Italie et la Norvège ont adopté des taxes sur l'énergie ou sur le dioxyde de carbone, avec parfois des exceptions importantes pour certaines industries lourdes ou exposées à la concurrence internationale. Une telle taxe, qui serait viable à l'échelle de la Communauté Européenne, est régulièrement étudiée.

Bien que la subvention soit moins employée dans le domaine de l'environnement, elle est, avec la taxe, l'un des instruments économiques les plus utilisés. Appliquée au problème de régulation des émissions de pollution, la subvention (comme la taxe) permet d'inciter les firmes à réduire leurs émissions<sup>2</sup>. Elle a, ainsi, l'avantage d'être utilisée stratégiquement par des pays (resp. groupe de pays) pour favoriser les firmes nationales (resp. des pays membres).

En théorie, une subvention peut inciter à émettre un niveau de pollution similaire à celui prévu avec une taxe. La firme touche une subvention unitaire pour chaque unité de polluant non émise et le taux optimal de la subven-

---

1. En Suède par exemple où la taxe a atteint 108 € (27 € en 1997), les ménages sont les plus taxés et contribuent à hauteur de 2.5 fois celle des industries (Crosemarie, 2009)

2. Pour un tour d'horizon assez détaillé sur le sujet, voir Mahenc (2008).

tion doit également être fixé au niveau du dommage marginal (au signe près). Toutefois, certains arguments sont souvent évoqués pour remettre en question l'équivalence des deux instruments. D'une part, la subvention encourage l'entrée d'un grand nombre de firmes en rendant profitables des activités qui ne le seraient pas si celles-ci étaient frappées d'une taxe. Par conséquent, même si la subvention entraîne la réduction des émissions individuelles des firmes d'un secteur quelconque, elle risque d'augmenter les émissions globales du secteur (Baumol et Oates, 1988, Ch. 14). D'autre part, contrairement à une taxe payée pour toute pollution émise, une subvention est versée pour toute pollution évitée. Ainsi, la mise en place d'une subvention suppose la définition d'un niveau de référence auquel les émissions futures seront comparées. À ce stade, les firmes peuvent se comporter stratégiquement en augmentant leurs émissions afin d'assurer des subventions ultérieures importantes (Kamien *et al.*, 1966). Pour rendre la subvention aussi efficace que la taxe, Polinsky (1979) propose alors de limiter la subvention uniquement aux nouvelles firmes entrants sur le marché.

Nous avons vu que le régulateur peut réguler la pollution à l'aide des taxes et subventions. Ces instruments permettent l'application du principe pollueur-payeur (ou « dépollueur-payé » pour la subvention). Ils sont les plus utilisés en France pour réduire les émissions des GES, notamment pour la taxe carbone et l'éco-prêt à taux zéro. Néanmoins, la taxe est souvent impopulaire et peut affecter la profitabilité des firmes fortement consommatrices d'énergie. Théoriquement, on présente le système de permis d'émission négociables comme un concurrent potentiel à la taxe, notamment par sa capacité à réduire davantage le coût de dépollution ainsi que par son expérimentation concrète dans le cadre du *Clean Air Act* de 1990 aux États-Unis dans la gestion des émissions de  $SO_2$ . Nous présentons dans la sous-section suivante le système de PEN, son fonctionnement et les principales méthodes pour l'allocation des permis.

### 1.3.2 Permis d'émission négociables (PEN)

Quelques décennies après l'introduction de la taxe, il est apparu le permis d'émission, instrument initié par Coase de l'étude critique à l'égard de la taxe pigouvienne. Les modalités de conception de cet outil ont été décrites pour la première fois dans les travaux de Dales (1968), avant d'être mis en application aux États-Unis pour réduire les émissions de dioxyde de soufre. Cet outil a pour principe l'allocation aux firmes de quotas d'émission correspondant à l'objectif environnemental fixé. Ces quotas s'achètent sur un marché sur lequel se confrontent l'offre et la demande.

Cet outil est considéré comme un instrument en quantité puisqu'il permet de fixer les émissions à un certain niveau. Le principe consiste à allouer des quotas d'émission (appelés aussi crédits, permis ou droits à polluer) aux firmes dont le montant correspond à l'objectif environnemental préalablement fixé. Ces quotas sont accessibles sur un marché. Ce dernier devra fonctionner de gré à gré par l'intermédiaire d'une bourse, à laquelle peuvent participer certaines firmes ou certains États, acheteurs ou vendeurs. Le polluant, faisant l'objet de l'échange, est converti en certificats d'émission, valant chacun une certaine quantité de polluant à émettre. Chaque transaction aura lieu à un prix qui résulte uniquement de la confrontation de l'offre et de la demande. Le prix du marché des quotas joue alors le même rôle que le montant de la taxe.

Dans son ouvrage fondateur « *Pollution, property and prices* » (1968), Dales est le premier à développer les premières réflexions théoriques sur un possible échange de droits à polluer entre agents. Ce type de transaction peut être considéré comme un moyen ouvrant la voie à une privatisation de l'environnement. Néanmoins, « *ces marchés ne constituent qu'une solution intermédiaire entre une gestion purement administrée par les pouvoirs publics et une exploitation abandonnée au jeu du marché. L'intervention réglementaire de l'État encadre l'exercice des droits et les restreint* », (Boisvert et al., 2004, p.11).

Le marché décrit par Dales doit être organisé selon certaines « règles » et où le régulateur est l'acteur principal. Le régulateur est le courtier et l'organisateur de ce marché, tous les échanges doivent se faire par son intermédiaire. Il doit par exemple intervenir pour acheter les droits à polluer lorsque la demande sur ces droits est trop faible, par rapport à l'offre, et en vendre d'autres dans le cas contraire (Dales, 1968, p. 94). L'auteur avance que le régulateur doit agir comme un spécialiste de bourse de valeur, prêt à intervenir en dernier recours pour acheter des droits, évitant ainsi une inondation du marché des permis. De la même façon, il doit intervenir pour en vendre d'autres lorsqu'il estime qu'il y a un besoin excessif de ces permis. Mais, ce régulateur ne peut pas garantir un prix efficace loin d'une confrontation libre de l'offre et de la demande et sans aucune connaissance parfaite des coûts d'abattement des agents. De plus, le régulateur se réserve le droit de corriger le niveau de pollution global autorisé sans avoir de comptes à rendre à qui que ce soit (Dales, 1968, p. 95-97). Ceci pourrait ainsi limiter l'incitation à recourir à ce marché.

L'instauration d'un marché de permis négociables offre deux intérêts majeurs : la certitude de l'objectif environnemental et la minimisation des coûts. En fait, les émissions de la firme sont limitées par le nombre de permis qu'elle détient (au contraire, une taxe ne garantit pas un objectif de dépollution et nécessite donc des ajustements). L'efficacité économique du système de permis vient du fait que la diminution des émissions s'opère là où elle est la moins coûteuse, ce qui se répercute positivement sur la réduction globale de la pollution. En outre, le commerce de permis d'émission présente l'intérêt de réduire le coût global d'abattement des émissions par égalisation des coûts marginaux de dépollution des différentes firmes.

Plusieurs mécanismes d'allocation initiale des permis existent. Les permis d'émission peuvent, par exemple, être alloués<sup>1</sup> initialement par une mise aux enchères. Le coût global supporté par les firmes comprend alors le coût de dépollution sur toutes les unités non émises auquel s'ajoute le prix payé pour l'acquisition initiale de permis. Les permis peuvent aussi être alloués gratuite-

---

1. Voir entre autres Godard (2000) et Stavins (2003) pour plus de détails sur les méthodes d'allocation des PEN.

ment selon deux méthodes principales. Ils peuvent être alloués généralement en fonction des émissions historiques « droit acquis » ou « *grandfathering* » de la firme ou en fonction d'un critère de performance présente ou future de celle-ci « benchmarking ». Pour ces deux méthodes, les firmes ne supportent que les coûts de dépollution. Ainsi, la différence première entre ces deux mécanismes d'allocation est que dans l'allocation par enchères, la firme supporte un coût dès la première unité de pollution émise, contrairement à la situation où les permis sont distribués gratuitement.

Un système d'enchères pose la question de l'utilisation des recettes collectées de la vente qui peut avoir une grande influence sur la compétitivité de la firme. Toutefois, les firmes ont plus d'intérêt à innover et à diffuser leurs innovations pour bénéficier de la baisse du prix du permis, ce qui n'est pas le cas lorsque les permis sont alloués gratuitement. Les firmes peuvent même être tentées de retarder la mise en place de mesures innovantes pour être dotées d'une plus grande quantité de permis<sup>1</sup> au départ.

Enfin, nous pouvons montrer que la répartition de l'allocation entre les firmes n'aura aucun effet sur le prix d'équilibre *ex post* des permis dès lors que l'échange s'effectue sur un marché concurrentiel (*cf.* sous-section 2.2.2). Certes, la richesse de chaque firme dépend du volume de l'allocation qui lui est attribuée, ce qui soulève sans doute des questions sur l'équité et l'implication de chaque firme dans le partage de l'effort total de dépollution. Cependant, la dépollution se fera, au niveau de la société au moindre coût. Le changement des allocations initiales, à allocation initiale totale inchangée, n'aura pas d'effet sur l'équilibre du marché des permis.

---

1. Par la directive 2003/87/CE du Parlement européen et du Conseil établissant un système communautaire d'échange de quotas d'émission de GES, la communauté européenne a mis en place un marché européen de quotas d'émission négociables de dioxyde de carbone, cette directive laisse aux États membre le choix de la méthode d'allocation des quotas entre exploitants concernés tout en garantissant la gratuité de l'allocation des quotas pour au moins 95% pour une période de trois ans à partir de 1er janvier 2005 et d'au moins 90% pour une période de 5 ans à partir de 1er janvier 2008 (art.10), (Communauté Européenne, 2003).

### 1.3.3 Équivalence entre la taxe pigouvienne et les permis d'émission

Avec la prise de conscience croissante des problèmes environnementaux, la préférence pour un instrument ou un autre n'est pas facile, et est toujours liée aux effets probables sur la compétitivité internationale, l'équilibre des marchés énergétiques, les coûts de transaction, l'efficacité environnementale ainsi qu'à la question de l'équité du partage du coût de la dépollution.

Si nous nous appuyons sur les critères d'efficacité environnementale et économique, les instruments réglementaires ne permettent pas souvent de tirer avantage de l'hétérogénéité du coût marginal de dépollution et, par conséquent, restent économiquement peu efficaces. Ainsi, les pouvoirs publics voient dans les instruments économiques, et plus particulièrement les taxes et les permis d'émission négociables, une alternative potentielle aux instruments réglementaires. Cependant, ces instruments économiques ne peuvent être efficaces que si leur mise en œuvre est soigneusement conçue et planifiée.

Idéalement, ces instruments doivent être appliqués en amont, au niveau des sources polluantes. En pratique, le législateur intervient indirectement, au niveau des produits dont la consommation entraîne des émissions polluantes, afin de réduire les coûts de gestion. L'application d'une imposition indirecte sur les produits énergétiques est un exemple permettant de réduire les émissions de carbone dans les secteurs domestiques et le transport.

La taxe a l'avantage de générer des recettes qui peuvent être employées pour abaisser les charges pesant sur le travail, par exemple. Cet atout peut être perdu avec la distribution gratuite des permis d'émission. Ainsi, les États souhaitant dégager des recettes pour réaliser une réforme fiscale environnementale pourraient bien se trouver dans l'obligation de renoncer à une distribution gratuite des permis pour ne pas mettre en péril leur industrie. Le permis échangeable a l'avantage d'être à la fois efficace, comme la taxe, mais aussi équitable dans la mesure où il permet d'inciter à l'abattement de la pollution là où il est moins coûteux.

En théorie et sous hypothèse d'information parfaite, ces deux instruments, permis et taxe, ont des effets d'incitations identiques (entre autre, Spulber, 1985) dans la mesure où ils modifient l'environnement économique des agents, qu'il s'agisse des ménages ou des firmes, en les incitant à modifier leurs comportements. Ils se basent sur l'application du principe pollueur-payeur. Généralement, la quantité des PEN à émettre est même simulée à l'aide d'une taxe sur les émissions, dont le prix est calculé de façon à atteindre le quota global. Toutefois, on évoque souvent la gratuité des quotas d'émission comme une distinction importante entre les permis et les taxes. En fait, lorsque l'allocation des permis se fait gratuitement, les transferts financiers s'effectuent uniquement entre les firmes. En revanche, dans le cas d'une taxe, les transferts se font en faveur de l'État.

Cependant, lorsque le coût de dépollution est inconnu ou mal connu, la taxe est appliquée sans pouvoir prévoir le résultat environnemental qui sera obtenu mais, avec l'avantage d'éviter un coût d'application trop élevé. Au contraire, on obtient l'effet inverse avec les permis négociables puisque l'objectif environnemental est garanti, mais sans avoir le pouvoir de contrôle du coût d'une telle politique, qui n'est plus quantifiable *ex-ante*. Il est encore difficile d'évaluer les biens environnementaux à leur juste valeur malgré les efforts considérables déployés pour leurs attribuer une valeur marchande. Pour contourner le problème d'évaluation des biens environnementaux, il est possible d'adopter un niveau de pollution jugé acceptable par les scientifiques<sup>1</sup>.

Par ailleurs, les permis d'émission ont été souvent perçus à tort comme une forme de privatisation de l'environnement. Or, la version originale de ces

---

1. 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 recommandée par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (Watson et Team, 2001) 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 dioxyde de carbone 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 dioxyde de carbone. 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.

permis, introduite par Dales (1968, p. 94-95), réserve un rôle fondamental au régulateur dans l'échange des permis. La version la plus libérale, qui prévoit quant à elle l'attribution définitive de ces droits, ne fait qu'officialiser ce qui est implicitement acquis sans contrepartie par les firmes. Ainsi, il serait plus juste que le régulateur définisse les règles d'attribution de ces droits de façon à garantir une efficacité économique et environnementale plutôt que de se perdre dans des discours idéologiques<sup>1</sup>.

Plus généralement, une fois les instruments de marché mis en application, il serait encore politiquement difficile de revoir le niveau de pollution ou le taux d'imposition<sup>2</sup>. À noter que la plupart des fonds collectés grâce à la taxe servent à alimenter la caisse de L'État<sup>3</sup> et non pas à lutter contre la pollution.

Plus le problème de pollution s'aggrave, plus les recherches sur la régulation de la pollution initialement focalisées sur la pollution de sources ponctuelles se tournent dans les dernières décennies vers la régulation de la pollution de sources non ponctuelles. Les instruments classiques de régulation des émissions, notamment la norme, la taxe sur le dommage environnemental et les permis, ne peuvent être utilisés pour réguler la pollution de sources non ponctuelles. Cela a poussé les économistes à explorer d'autres instruments incitatifs tels que la taxe sur l'intrant, la taxe sur le produit et la taxe ambiante. Ces instruments, qui sont peu utilisés, peuvent constituer dans plusieurs cas des bons alternatives aux instruments classiques.

---

1. Le problème n'est pas dans l'allocation des permis mais plutôt dans la façon de les attribuer. En effet, ce qu'il faut craindre c'est plutôt une attribution des droits n'obéissant pas à des considérations économiques mais à des pressions de lobbies ; à l'instar de ce qui s'est passé lors de l'attribution des quotas dans le cadre du marché européen.

2. Pour d'autres raisons qui ont contribué à retarder l'utilisation des moyens incitatifs, voir Jaffe *et al.* (2002).

3. On 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*.

## 1.4 Incertitude et choix d'instruments de régulation de pollution

L'efficacité économique des politiques de contrôle des émissions diffère selon les caractéristiques des émissions et selon le type de firmes visé. Or, dans le cas des émissions diffuses, le régulateur ne peut pas avoir d'informations parfaites sur les caractéristiques des firmes. Les instruments classiques recommandés pour contrôler la pollution de sources ponctuelles ne sont alors plus toujours aussi efficaces (voir entre autres, Braden et Segerson, 1993; Xepapadeas, 1999; Shortle et Horan, 2001).

Pour faire face aux problèmes d'asymétrie d'information, le régulateur peut s'appuyer sur des outils de la théorie des incitations et de la théorie de l'agence pour pousser les firmes à révéler directement certaines de leurs caractéristiques, notamment liées à leur coût de dépollution.

On peut distinguer deux situations d'asymétrie d'information : i) l'aléa moral qui se produit dans la situation où les décisions prises par les firmes ne sont pas directement observables par le régulateur. Ainsi, une firme peut profiter de cette asymétrie d'information pour entreprendre des actions non conformes à ce qu'attend le régulateur. Concrètement, la firme peut tromper le régulateur sur ses véritables efforts de réduction des émissions pour échapper au paiement de la pénalité due au non respect de la politique environnementale. ii) Même si le régulateur peut observer les résultats des efforts de réduction des émissions faites par les firmes (et à un coût raisonnable), il est incapable de distinguer les firmes selon leurs coûts de dépollution. Seule la firme est sensée détenir les informations sur ses pratiques de production et n'est pas prête à les divulguer gratuitement au régulateur. Ainsi, l'exécution des contrats portant sur la dépollution peut donner lieu à l'apparition d'un autre type de difficulté associé au manque d'information *ex ante* sur les coûts des firmes impliquées dans l'émission de la pollution, à savoir l'antisélection. Ce phénomène traduit une situation où le régulateur risque de mal répartir l'effort de dépollution entre les firmes. Ainsi, il peut imposer à toutes les firmes le même niveau d'abattement en dépit de leur capacité de dépollution.

On parle alors d'antisélection puisque finalement les mesures de dépollution imposées par le régulateur ne ciblent pas le type de firmes qui aurait dû être impliqué davantage, mais à l'inverse épargnent les firmes qui ont une grande capacité à réduire leurs émissions. Cela réduit par conséquent l'efficacité escomptée des mesures mises en œuvre par le régulateur.

Plus particulièrement, un régulateur qui cherche à taxer des firmes à coûts d'abattement hétérogènes imposerait des émissions à un taux se situant entre le taux, imposé au type de firmes à coût le plus bas et celui imposé au type de firmes à coût le plus élevé, en cas d'information complète. Ainsi, la tarification unique de la pollution donne lieu à des distorsions, conduisant à des pertes de bien-être collectif. Le régulateur peut faire mieux en soumettant sa fonction objectif à des contraintes supplémentaires qui donneront lieu à des rentes versées à certains types de firmes (Akerlof, 1970; Rothschild et Stiglitz, 1976; Salanié, 1994). Cette rente informationnelle est habituellement versée aux firmes efficaces en contrepartie de la révélation de leurs types, car ces dernières peuvent prétendre avoir des coûts d'abattement élevés et se faire passer pour des types inefficaces. Ceci permet de mieux prévoir la réaction des agents et par conséquent de concevoir une politique qui quoi qu'elle ne permette pas d'atteindre l'optimum de premier rang permette de l'approcher. Un modèle d'antisélection appliqué aux droits à polluer est proposé dans le chapitre 4.

Dans cette section, nous discutons trois approches de contrôle des émissions diffuses : une première approche consiste à exploiter l'existence d'une corrélation entre la quantité d'émission et la quantité d'intrant (ou de sortant) pour en déduire les émissions individuelles des firmes (Larson *et al.*, 1996). Cette approche fera l'objet de la sous-section 1.4.1.

Le régulateur peut également recourir à une taxe ambiante (Segerson, 1988; Xepapadeas, 1991, 1992; Cochard *et al.*, 2007). Cette taxe s'attaque aux émissions ambiantes et non les émissions individuelles, contrairement à la taxe pigouvienne (sous-section 1.4.2). Enfin, la dernière sous-section (1.4.3) discute de la régulation des émissions par une combinaison taxe-permis (Ro-

berts et Spence, 1976). Cet instrument hybride permet de réduire l'incertitude sur les coûts de dépollution des firmes inconnus au régulateur et, constitue l'objet d'étude principal des chapitres 2 et 3.

### 1.4.1 Taxe sur les intrants

Devant l'incapacité de suivre et d'inférer les émissions de chaque firme à un coût raisonnable, la littérature propose, entre autres, deux solutions fiscales intervenant à deux niveaux : en amont par l'application d'une taxe sur les intrants (les engrais par exemple)(Griffin et Bromley, 1982; Shortle et Dunn, 1986; Shortle et Abler, 1994; Cochard *et al.*, 2005) et en aval par l'application d'une taxe sur les excédents de polluant qui ne sont pas absorbés par le produit.

Ces deux types de taxe sur les intrants peuvent remplacer une taxe sur les émissions (Griffin et Bromley, 1982). Mais, cela suppose une corrélation significative entre la quantité d'intrant et les émissions de polluant constatées dans le milieu. Certes, la quantité de pollution observée dans le milieu dépend de la quantité des produits polluants utilisés dans le processus de production, mais d'autres éléments s'y ajoutant font qu'il n'est pas toujours possible d'obtenir une relation déterministe entre la quantité d'intrant utilisée et la quantité de pollution relevée dans le milieu (Verchère, 2004).

Considérons par exemple, la pollution de l'eau d'origine agricole, largement constatée en Europe. Elle est présentée comme une conséquence de l'accroissement de la productivité agricole, soutenue par la politique agricole commune (PAC) des années 70-80, en raison d'une utilisation intensive d'azote en grande quantité comme fertilisant par certains agriculteurs souhaitant s'assurer des rendements élevés. La surfertilisation est aussi souvent considérée par les agriculteurs comme un moyen de s'assurer contre le risque de mauvaises conditions climatiques (Spaeter et Verchère, 2004). Or, cette quantité n'est pas toujours totalement absorbée par les plantes, notamment en présence de facteurs pédoclimatiques non propices tels que les périodes de fortes pluies ou encore les orages qui facilitent la fuite du polluant vers la

nappe phréatique.

L'application de la taxe augmente le prix de l'intrant et peut diminuer, par conséquent, la demande de celui-ci. En Europe, son utilisation s'est révélée efficace, notamment en Suède, au Danemark et en Finlande<sup>1</sup>. Appliquée sur le prix de vente des produits agrochimiques, elle a permis une réduction de l'azote de 10% et des pesticides de 35% (voir Ekins et Speck, 1999; Stavins, 2003).

Le niveau d'émission dépend également d'autres variables comme nous l'avons déjà évoqué précédemment. Cependant, l'existence d'une corrélation significative entre le niveau de pollution et certains volumes d'intrant (ou de produit) ne suffit pas à recommander cet instrument pour plusieurs raisons. Tout d'abord, un certain niveau de consommation de l'intrant peut s'accompagner parfois d'une baisse des émissions du polluant lorsque les firmes changent de technologie. Ensuite, taxer les intrants implique des distorsions dans le choix des intrants et peut induire des substitutions inappropriées, processus soulevées par Russell (1986) et Eiswerth (1993). Enfin, taxer les produits polluants et subventionner les moins polluants est une tâche difficile, coûteuse (pour différencier les produits peu polluants des produits fortement polluants) et doit se faire à un taux élevé selon Hellegers et Ierland (2003).

Une autre solution consisterait alors à mettre en place une taxe payée sur l'excédent d'azote non assimilé au cours du processus de production au

---

1. Plusieurs pays européens ont appliqué la taxe pour contrôler la pollution. Ainsi, en Autriche la taxe a été appliquée sur les engrais en fonction de leur teneur en azote, en phosphore et en potasse. Cette taxe a été abolie lors de l'entrée dans l'UE à cause de son effet estimé défavorable sur la compétitivité de l'agriculture. En Finlande, une taxe a été appliquée sur la quantité d'engrais, quelque soit la teneur en azote. Celle-ci a été remplacée par une taxe calculée en fonction de la teneur des engrais en azote avant qu'elle ne soit abolie lors de son entrée dans l'UE. En Suède, la taxe est appliquée sur la quantité d'engrais fabriquée ou importée selon sa teneur en azote. Contrairement aux pays précédents, les Pays-Bas ont choisi de taxer le surplus azoté, indication fiable sur les émissions qui risquent de contaminer la nappe phréatique d'eau et donc plus proche de ce que préconise la théorie en matière d'internalisation des émissions. Notons que la taxe suédoise a été jugée inefficace, coûteuse et injuste. Ainsi, les syndicats agricoles ont exprimé leur souhait d'adopter la taxe sur le surplus, comme au Pays-Bas (Verchère, 2004; Bel *et al.*, 2004).

lieu d'imposer la quantité totale d'intrant. En fait, imposer l'excédent revient à taxer exactement les émissions individuelles, sources d'externalité. Au contraire, appliquer une taxe sur les intrants dépasse l'objectif de la politique environnementale qui consiste à imposer les émissions, pour englober la quantité totale d'intrant, y compris celle absorbée par le produit. Par conséquent, cet instrument est équivalent à une taxe pigouvienne, et préférable à une taxation de l'intrant. Toutefois, la productivité dépend de la quantité du fertilisant épandu, mais elle dépend aussi d'autres facteurs non observables tels que la technique employée et la période d'utilisation du fertilisant. Cette solution peut finalement souffrir d'un manque de corrélation parfaite entre la quantité de sortant produit et celle de polluant émise.

### 1.4.2 Taxe ambiante

En raison du caractère diffus des émissions provenant des sources de pollution non ponctuelles, le contrôle de celles-ci par des instruments nécessitant l'observation des émissions individuelles est inefficace (voir entre autres, Segerson, 1988; Xepapadeas, 1995; Cochard *et al.*, 2005). La taxe ambiante est alors l'un des instruments pouvant constituer une alternative à la taxe pigouvienne (Segerson, 1988).

Par l'emploi de cet instrument, le régulateur cherche à exploiter les informations dont il dispose sur le niveau de pollution ambiante pour appliquer une taxe sur la différence entre le niveau de pollution observé dans le milieu et un niveau de pollution souhaitable arbitrairement choisi (qui peut être le niveau historique constaté dans le milieu par exemple). Chaque firme est tenue de payer la même taxe ambiante.

Cet instrument permet de résoudre le problème du passager clandestin sans avoir besoin de contrôler individuellement les émissions. L'observation des émissions dans le milieu ambiant suffit. Toutefois, cette taxe a également quelques inconvénients en termes d'application. D'abord, il est difficile de convaincre une firme quelconque de payer une taxe en fonction des émissions de l'ensemble des firmes plutôt que de ses propres émissions (plus en-

core lorsque les émissions dépendent de variables stochastiques (réf. supra)). Ainsi, l'application de cette taxe peut poser un problème juridique selon Xepapadeas (1991) puisque la firme devrait être imposée sur des émissions qui ne sont pas forcément les miennes. De plus, l'application de cette taxe sur les émissions collectives peut donner lieu à des montants de taxes (ou de subventions) colossaux. Par conséquent, une telle taxe ne pourrait pas être appliquée dans des milieux impliquant un grand nombre de firmes comme c'est le cas de la pollution de l'air. Enfin, elle se heurte au même problème que les instruments classiques dans la mesure où, avec cette taxe, le régulateur peut atteindre un objectif donné, mais sans être sûr qu'il s'agisse bien du niveau socialement optimal. Sans connaissance des fonctions de coût des firmes, le niveau optimal ne peut pas être atteint avec certitude.

Dans un cadre d'analyse assez différent mis en évidence par Xepapadeas (1995), le régulateur doit concevoir une politique de régulation de la pollution en fonction de l'aversion au risque des firmes. L'auteur montre ainsi que les firmes averses au risque préfèrent révéler leur niveau d'émission en contrepartie d'une taxe à un taux inférieur. Une telle révélation protège les firmes d'une taxe trop élevée lorsqu'un choc stochastique se produit. Elle permet également au régulateur de transférer une partie de la PsnP (resp. une taxe ambiante) en une PsP (resp. une taxe pigouvienne).

Une combinaison<sup>1</sup> entre instrument réglementaire et taxe ambiante est plus efficace qu'une taxe ambiante seule (Xepapadeas, 1995). Une autre idée serait cette fois de combiner taxe et permis.

### 1.4.3 Combinaison taxe-permis

Une taxe ne garantit pas la certitude d'atteindre le niveau d'abattement préalablement ciblé car la réaction des firmes à cette taxe est incertaine. Une approche par les permis permet d'avoir une certitude sur le niveau d'abattement à réaliser, mais aucune certitude, en revanche, sur le prix d'équilibre

---

1. Une taxe pigouvienne par exemple pour les firmes averses, qui acceptent que leurs émissions soient observables ou qui donnent des informations qui permettent de les déduire, et une taxe ambiante pour le reste des firmes.

qui en ressort. En outre, le permis est vu comme un droit de propriété dont l'échange n'implique *a priori* que les firmes. Il est donc difficile d'agir sur le prix de ces permis une fois alloués sans prévoir un système de compensation. Au contraire, la taxe est un outil qui est plus réversible que les permis. Elle permet au régulateur de rejoindre le niveau voulu en révisant ses taux d'imposition par tâtonnement. Dans ce cas, elle devra être supérieure au permis selon Kaplow et Shavell (2002). Ces auteurs proposent une taxe progressive, qui dépend du niveau de la pollution, plutôt que d'une taxe linéaire, c'est-à-dire une taxe qui permet d'ajuster le prix des émissions dans le cadre d'un processus d'apprentissage et de corriger les éventuelles erreurs d'estimation de la fonction de coût agrégée. Cependant, un coût administratif élevé, qui est susceptible d'accompagner le processus de tâtonnement, pourrait rendre cette solution inapplicable.

Traditionnellement, les économistes avançaient l'idée d'une taxe linéaire supérieure à l'instrument quantité, le permis en l'occurrence. Mais, ce concept sera réfuté avec l'apparition de l'article fondateur « *Prices vs. Quantities* » dans lequel Weitzman (1974) explique 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. Ainsi, moins le régulateur est certain de l'estimation de ces courbes, plus la décision de contrôler les émissions par l'un des deux instruments purs devient risquée (Baumol et Oates, 1988, ch.5). Nous détaillerons les principaux résultats de son analyse dans la première partie du chapitre 2.

Pour retrouver l'optimum ou l'approcher, la conception de l'instrument de contrôle des émissions doit prendre en compte la non linéarité du prix des émissions. C'est dans ce sens, et sur la base de l'analyse de Weitzman (1974), que certains chercheurs (notamment Roberts et Spence (1976), Pizer (1999, 2002); Courne de et Gastaldo (2002)) ont proposé des mécanismes de régulation d'émission hybrides qui consistent à vendre des permis à un prix de marché plafonné et au-delà duquel les firmes devront s'acquitter d'une taxe ou acheter des permis à des prix prédéterminés.

Il s'avère, d'après l'analyse de Weitzman (1974, p. 488), qu'à court terme, un système prix est préférable à un système quantité lorsque les firmes produisent des sortants substituables entre-elles. Ceci résulte probablement du fait que sous ces conditions, les bénéfices marginaux de dépollution sont linéaires aux émissions. C'est le cas notamment des bénéfices marginaux de la politique climatique issus des simulations de Nordhaus (1994). Toutefois, un système pure taxe ou pur permis n'est qu'un cas particulier du système hybride qui les domine.

Deux ans après, Roberts et Spence (1976)<sup>1</sup> montrent qu'un instrument combinant taxe et permis permet de revoir les estimations de coûts d'abattement en cas d'erreur commise par le régulateur. Dans leur modèle, chaque firme peut acquérir une dotation initiale en permis d'émission auprès du régulateur. Si les coûts totaux se sont avérés plus élevés que ceux estimés (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 prévu, 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 aux firmes le paiement d'un prix plafond sous forme d'une pénalité lorsque la dotation initiale ne suffit pas pour couvrir la totalité de leurs émissions. Il assure également une incitation minimale à la dépollution sous forme de subvention versée à la firme, qui n'épuise pas la totalité de sa dotation initiale en permis. Ce système hybride domine les deux systèmes purs, prix et quantité séparés, et devrait, par conséquent, être au moins aussi performant que l'un des deux.

Le problème de tarification des émissions est avant tout un problème de connaissance des coûts d'abattement des firmes. Weitzman (1978) analyse le cas de plusieurs firmes soumises à une taxe non linéaire. Il suppose que le régulateur peut astreindre chaque firme à un taux d'imposition spécifique dépendant uniquement de ses propres émissions et non des actions des autres

---

1. Noté parfois R&S dans ce qui suit.

firmes. En d'autres termes, les firmes maximisent leurs profits en absence de tout comportement stratégique entre les firmes. Cette taxe à l'avantage d'éviter certains problèmes d'information et de choix stratégique. Toutefois, l'hypothèse, faite par l'auteur sur la connaissance du régulateur des informations nécessaires relatives aux coûts de dépollution de chaque firme, est forte. Ainsi, sous cette hypothèse simplificatrice, les firmes choisissent leur niveau d'émission qui égalisent leurs coûts marginaux et leurs bénéfices marginaux. Weitzman confirme les résultats de R&S et montre que la meilleure tarification correspond à un système hybride. Ce système combine les deux instruments, prix et quantité, et est donc supérieur aux deux séparés. Il constitue une « soupape de sécurité » lorsque le niveau d'abattement objectif *ex post* s'avère soit trop restrictif soit trop laxiste.

Un système proche a été proposé par McKibbin et Wilcoxon (1997) pour contrôler la pollution de l'air. Les auteurs proposent d'autoriser les pays à allouer certains permis supplémentaires à leurs firmes. Ces permis seraient achetés par les gouvernements à prix fixe négocié au niveau international. L'objectif serait de pouvoir réagir à une éventuelle flambée du prix des permis si la dépollution s'avère coûteuse.

Dans la même lignée d'instruments, Pizer (1999) propose une version hybride qui permettrait aux firmes l'acquisition de permis au prix de marché à une période donnée. Toute demande ultérieure devrait être satisfaite par le régulateur, à un prix prédéterminé. Pizer observe que les taxes sont plus efficaces, en présence d'incertitude, que l'instrument quantité. Cela s'explique selon lui par le fait que la fonction de dommage est relativement plate et que les dommages vont être négativement corrélés avec les coûts. Ainsi, par ce résultat, l'auteur sous-entend une préférence pour l'instrument prix sur l'instrument quantité, comme cela avait préalablement été souligné par Weitzman (1974).

Dans un cadre dynamique, Pizer (2002) conclut encore que des simulations stochastiques sur la base d'un modèle d'équilibre général calculable, appliqué à la pollution comme les émissions de gaz à effet de serre, montrent qu'à très court terme (un an) on trouve des résultats qui rejoignent les in-

tutions de Weitzman (1974) sur la supériorité de la taxe par rapport au permis. En effet, la taxe génère un bénéfice social plus important que dans le cas des permis. À long terme (50 ans), en tenant compte de la croissance économique, la taxe reste encore plus efficace que le permis. L'application d'une taxe génère un bien-être cinq fois supérieur à l'application de permis. Cela est dû à la forme relativement aplatie de la courbe du bénéfice marginal (la forme quadratique de la fonction de dommage). En revanche, une hausse significative du dommage pourrait encourager l'utilisation du permis, ce qui confirme le résultat fondamental de Weitzman (1974).

Le système hybride permet finalement d'améliorer le bien-être par rapport à une taxe. Il préserve les propriétés inhérentes au permis, à savoir la distribution de rentes associées au permis et la flexibilité. Ces propriétés sont essentielles pour impliquer les firmes dans la réduction des émissions et réduire ainsi le coût de la politique environnementale.

## 1.5 Conclusion

Nous avons vu que le véritable problème de la régulation de la pollution réside dans l'asymétrie de l'information sur le coût de dépollution entre le régulateur et la firme. En effet, seule la firme est supposée connaître parfaitement son coût de dépollution, contrairement au régulateur n'en a qu'une estimation. L'incertitude sur le coût remet alors en question l'équivalence entre instrument prix (taxe) et instrument quantité (permis), traitée dans la section 1.3.

Dans le chapitre suivant nous présenterons deux articles étudiant la question. Le premier est « *prices vs quantities* », dans lequel Weitzman (1974) élabore un critère permettant de comparer l'efficacité entre un instrument prix et un instrument quantité, en situation d'incertitude sur les coûts et les bénéfices de dépollution. Le deuxième article est une extension du précédent, dans lequel Roberts et Spence (1976) montrent qu'un système hybride taxe-permis est nécessairement supérieur où un système taxe seule ou permis seul sont des cas particuliers du système hybride.

# Chapitre 2

## TAXE OU PERMIS VS TAXE-PERMIS

### 2.1 Introduction

D'après les théorèmes fondamentaux du bien-être, nous savons que, si l'information est parfaite, le régulateur peut atteindre l'optimum d'émission en annonçant un système de prix (taxe par exemple) à des firmes concurrentielles. À l'aide de ce système, le régulateur peut décentraliser la dépollution sans avoir besoin d'annoncer l'objectif quantitatif de dépollution à atteindre. En fait, une firme prend le prix comme donné et détermine son niveau d'émission optimal, qui coïncide avec le même niveau recherché par le régulateur. Néanmoins, comme le régulateur est en mesure de déterminer l'objectif d'émission optimal, il peut directement l'imposer à la firme sans passer par le système de prix. Ainsi, lorsque l'information circule parfaitement entre le régulateur et les firmes, la prescription directe de l'objectif de dépollution optimal ou l'annonce d'un système de prix qui permet de l'atteindre aura le même résultat sur le niveau global d'émission de la pollution puisqu'un système entraîne l'autre.

En cas d'information imparfaite, les deux mécanismes ne sont plus équivalents. Weitzman (1974) a essayé de comparer les deux mécanismes d'allocation : le mécanisme en quantités où le régulateur alloue directement les quan-

tités objectifs aux firmes et le mécanisme en prix où le régulateur annonce un système de prix à des firmes concurrentielles qui, en réponse, réagissent par leurs demandes. Pour se faire, il utilise une analyse coût-avantage afin de mesurer l'efficacité de ces deux mécanismes lorsque les fonctions de coût sont connues des firmes, mais aléatoires du point de vue du régulateur.

Nous consacrons ce chapitre à l'examen formel des modèles principaux qui ont abouti aux résultats discutés dans le premier chapitre. Nous nous intéressons en particulier aux modèles développés en information imparfaite après avoir rappelé ceux relatifs à l'information parfaite.

Nous commençons d'abord par traiter dans la section 2.2 la réglementation de la pollution en information parfaite. Nous constatons qu'il est équivalent d'utiliser la taxe ou les permis. Or, en pratique, le régulateur a souvent des incertitudes sur les fonctions de coût ou de dommage. Ainsi, nous élargissons l'analyse de la politique environnementale au cas où l'information est imparfaite et discutons, dans la section 2.3, l'efficacité de la taxe et des permis en comparaison au cas où l'information est parfaite.

La section 2.4 fait l'objet d'une présentation de l'article fondateur de Weitzman (1974). À travers cet article nous explorons le rôle de l'incertitude dans le choix des instruments de la politique environnementale en situation d'incertitude.

Sur la base des résultats initiaux de l'analyse de Weitzman, d'autres auteurs ont proposé des solutions hybrides qui consistent à combiner les permis et la taxe. Parmi ces solutions, nous exposons celle de Roberts et Spence (1976) qui fera l'objet de la section 2.3.

## 2.2 Régulation de pollution : analyse formelle

Nous développons le modèle permettant d'expliquer comment atteindre un objectif environnemental socialement optimal. Nous consacrons cette section au cas classique où l'information est parfaite, nous nous basons sur des

manuels de microéconomie, en particulier (Varian, 1992) et (Kolstad, 2000). Nous supposons que les firmes sont sur des marchés concurrentiels afin que la maximisation du profit implique la minimisation des coûts. Notre étude se concentre surtout sur la minimisation des coûts.

Considérons une firme  $i$  dont la production d'un bien donné en quantité  $y_i$  s'accompagne d'émission d'un polluant en quantité  $x_i$ . Lorsque la pollution est réglementée le coût de production de la firme s'écrit  $C^i(x_i, y_i)$ . Nous supposons que les firmes ne peuvent pas influencer le prix du bien, c'est-à-dire que celui-ci est produit tel que son prix est égal à son coût marginal de production. Sous cette hypothèse, le coût de production de la firme peut être séparé en deux coûts distincts : le coût de production du bien normalisé à zéro, pour des raisons de simplicité, et le coût de dépollution qui dépend uniquement de  $x_i$ , noté  $C^i(x_i)$  (Roberts et Spence, 1976; Requate, 2005)<sup>1</sup>.

1. La preuve de ce résultat, montré par Roberts et Spence (1976, note bas de page 3, p195), est la suivante : soit  $P(q)$  la demande inverse de la firme,  $d(q, x)$  son coût et  $t$  le prix des émissions. Le surplus généré par le marché est :

$$T = \int_p^q P(s) ds - d(q, x) - tx.$$

Soit  $G(s)$  tel que  $G'(s) = P(s)$  ( $G$  est une primitive de  $P$ ), alors :

$$\begin{aligned} \int_p^q P(s) ds &= \int_p^q G'(s) ds \\ &= G(q) - G(p) \end{aligned}$$

Différenciant par rapport à  $x$ , nous avons :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} (G(q) - G(p)) &= G'(q) \cdot \frac{d}{dx} \\ &= P(q) \cdot \frac{d}{dx} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dx} &= P(q) \cdot \frac{d}{dx} - \left( d_q(q, x) \frac{d}{dx} + d_x(q, x) \right) - t \\ &= (P - d_q) \cdot \frac{dq}{dx} - (d_x + t) \end{aligned}$$

Pour une firme qui maximise son profit on a  $d_x + t = 0$ . À ce point  $dT/dx = 0$  seulement si  $P = d_q$  (prix égal au coût marginal c'est-à-dire le secteur est compétitif) ou  $dq/dx = 0$ . Celui-ci se produit lorsque  $d_{xq} = 0$ . Par conséquent, quand un secteur concurrentiel optimise les profits (les coûts ou la perte des profits), l'optimum social est

Ce coût est connu pour le moment du régulateur.

Par ailleurs, quelque soit le niveau d'émission inférieur au niveau  $\bar{x}_i$  émis en absence de réglementation de l'activité polluante, le coût marginal de dépollution  $C_{x_i}^i$  est négatif, puisque le coût de dépollution décroît avec le niveau d'émission du polluant. De plus, il est raisonnable de supposer que le coût marginal de dépollution est élevé lorsque le niveau d'émission est faible mais baisse au fur et à mesure que le niveau d'émission devient important c'est-à-dire, la pente de sa courbe est négative :  $x_i, C_{x_i x_i}^i(x_i) > 0$ .

Considérons  $C(x)$  le coût agrégé de dépollution, défini comme la somme des coûts individuels des  $n$  firmes qui émettent une quantité totale de pollution de  $x = \sum_i^n x_i$  :

$$C(x) = \sum_i^n C^i(x_i) \tag{2.1}$$

Par ailleurs, le coût marginal agrégé de dépollution, noté  $C_x$ , indique le coût de la dépollution quand la pollution baisse d'une unité. La fonction du coût marginal agrégé est construite par addition horizontale des coûts marginaux de  $n$  firmes qui composent l'économie, (voir Fig. 2.1). Le coût marginal agrégé dépend des hypothèses retenues sur la façon dont l'effort de dépollution total est réparti entre les firmes. En fait, si une firme réduit la totalité des émissions  $x$  alors que les autres firmes ne font rien, le coût marginal sera plus important que lorsque toutes les firmes contribuent à la réduction des émissions. Dans ce qui suit, nous supposons comme chez Roberts et Spence (1976) que l'effort de dépollution est réparti entre les firmes de façon à minimiser le coût, c'est-à-dire de façon à égaliser les coûts marginaux de toutes les firmes, ainsi le coût total du contrôle de la pollution est réduit au minimum puisque :

---

atteint. Mais, si la firme dispose d'un pouvoir du marché  $p > d_q$ , il y aura trop ou peu de dépollution selon le signe de  $dq/dx$ .

Requate (2005, note bas de page 3, p177) démontre ce résultat de façon similaire.

$$C_x^i(x_i) = C_x^j(x_j) \quad \forall i, j \quad (2.2)$$

**Preuve : La minimisation du coût agrégé est équivalente à l'équimarginalité :**

Pour atteindre un niveau de pollution  $x > 0$  quelconque, le programme de minimisation du coût agrégé s'écrit :

$$\min_{x_1, x_i, \dots, x_n} \sum_{i=1}^n C^i(x_i) \quad \text{s.c.} \quad x = \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.3)$$

Le lagrangien de ce programme s'écrit :

$$\min \sum_{i=1}^n C^i(x_i) - \lambda \left( x - \sum_{i=1}^n x_i \right) \quad (2.4)$$

Les conditions de premier ordre de ce programme correspondent à l'égalisation des coûts marginaux de dépollution :

$$-C_{x_1}^1(x_1) = \dots = -C_{x_i}^i(x_i) = \dots = -C_{x_n}^n(x_n) = \lambda \quad \blacklozenge$$

En outre, soit  $D^i(x)$  le dommage, positif et croissant en  $x$ , que provoque l'émission de la quantité de pollution émise par la firme  $i$ . Le dommage marginal,  $D_x^i > 0$ , est aussi croissant en  $x$ . En fait, lorsque le niveau de pollution est faible, une unité supplémentaire de pollution cause un faible dommage mais lorsque le niveau de pollution est élevé, une unité supplémentaire de pollution provoque un dommage plus élevé (soit  $D_{xx}^i(x) > 0$ ) (voir Fig. 2.1). Le dommage marginal agrégé est la somme verticale des dommages marginaux individuels. Nous supposons, ainsi, le long de cette thèse que la fonction de dommage agrégé dont les propriétés  $D_x > 0$  et  $D_{xx} > 0$  est connaissance commune.

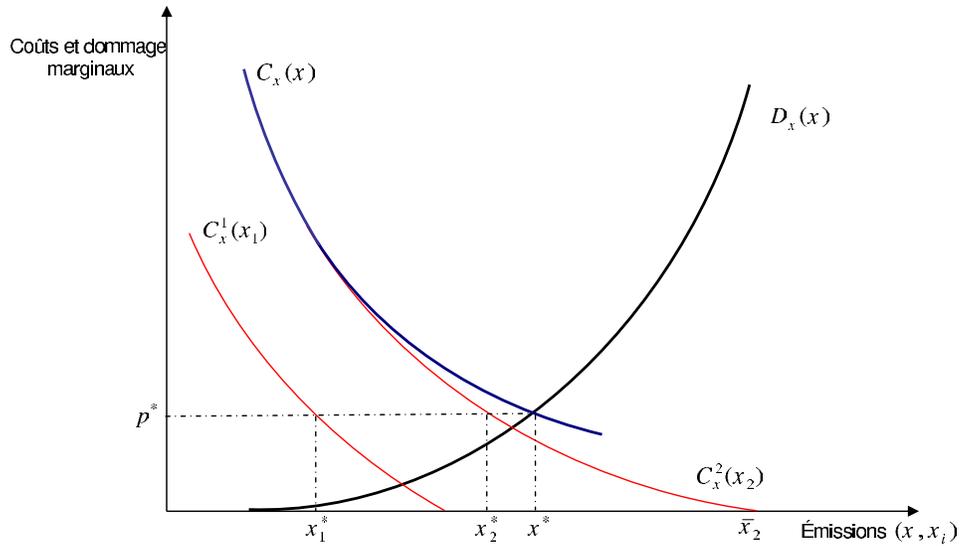


FIGURE 2.1 – Coût marginal de dépollution

La figure 2.1 illustre le coût de dépollution d'une unité supplémentaire de pollution en fonction des émissions totales,  $C_x(x)$ . Ce coût est d'autant plus fort que le niveau d'émission est faible, ainsi cette propriété traduit la difficulté croissante de dépolluer. Sur la même figure,  $D_x(x)$  représente le dommage que subit la société lorsque la pollution augmente d'une unité de pollution. Les courbes  $C_x^1(x_1)$  et  $C_x^2(x_2)$  sont respectivement les coûts marginaux des firmes 1 et 2. Notons que lorsque la pollution n'est pas réglementée, le niveau d'émission maximal de pollution est  $\bar{x}$ , le niveau de pollution non réglementé.

On peut lire aussi sur la figure le niveau socialement optimal de pollution  $x^*$ , c'est-à-dire qui minimise le coût total et le dommage total de la pollution. Il vérifie :

$$x^* = \operatorname{argmin} [C(x) + D(x)] \quad (2.5)$$

C'est-à-dire

$$x^* \quad / \quad -C_x(x) = D_x(x) \quad (2.6)$$

Or chaque firme, sans contrainte environnementale, émet :

$$x_i^* = \operatorname{argmin} C^i(x_i) \quad (2.7)$$

C'est-à-dire

$$x_i^* \quad / \quad -C_{x_i}^i(x) = 0 \quad (2.8)$$

Avec  $C_x \neq \sum C_{x_i}^i$ , on voit clairement que  $\sum x_i^* > x^*$ . De ce fait, lorsqu'on laisse faire, il ne coûte rien pour les firmes de polluer davantage. Dans le paragraphe suivant nous nous appuyons sur Baumol et Oates (1988) pour rappeler comment une taxe pigouvienne peut être fixée pour implémenter le niveau de pollution socialement optimal.

### 2.2.1 Taxe pigouvienne

Soit  $t$  le taux d'une taxe d'émission uniforme. Si le régulateur impose à une firme  $i$  de payer une taxe  $t$  par unité de pollution, celle-ci choisit le niveau d'émission qui minimise ses coûts privés en tenant compte de la taxe :

$$x_i^* = \operatorname{argmin} [C^i(x_i) + t.x_i] \quad (2.9)$$

La solution de ce programme est donnée par la condition de premier ordre suivante :

$$-C_{x_i}^i(x_i) = t \quad (2.10)$$

Autrement dit, puisque la pollution est nuisible, le prix est négatif. En d'autres termes, la firme paie  $t$  pour chaque unité de pollution qu'elle émet.

Ainsi, elle émettra jusqu'à ce que le coût marginal de l'émission  $t$  soit égal à son bénéfice marginal  $-C_{x_i}^i$  (c'est-à-dire l'économie réalisée en ne dépolluant pas) :

Si le taux de la taxe  $t$  est le même pour toutes les firmes, à l'équilibre, les coûts marginaux de la pollution sont tous égaux au taux de la taxe. Cela nous amène à déduire d'après les équations (2.6) et (2.10) que le régulateur doit choisir le taux de la taxe  $t^*$  qui vérifie :

$$-C_x(x) = -\sum_{i=1}^n C_x^i(x) = n \cdot t = D_x(x) \quad (2.11)$$

Si le régulateur dispose de l'information complète sur le coût marginal de toutes les firmes, la régulation de la pollution peut se faire de façon efficace par application d'une taxe pigouvienne. Ainsi, avec un taux de taxe égal au dommage marginal, le niveau de la pollution atteint correspond à un optimum de premier rang.

En réponse à la taxe pigouvienne, Coase (1960) démontre que si les coûts de transaction sont nuls (ou relativement faibles par rapport aux bénéfices espérés) et si les droits de propriété sont parfaitement définis, l'intervention du régulateur via une incitation supplémentaire de la taxe n'est pas nécessaire et les distorsions liées à la pollution peuvent être résolues volontairement entre les firmes. Par conséquent, les mécanismes du marché suffisent pour internaliser de façon optimale le coût externe dans le cadre d'information parfaite, comme nous le rappelons formellement dans la sous-section qui suit.

### 2.2.2 Allocation des permis d'émission négociables

L'extension des travaux de Coase faite par Dales (1968) a donné lieu aux premières réflexions théoriques sur l'idée de répartir l'effort de dépollution entre les firmes à l'aide des permis d'émission négociables. L'échange de ces permis fonctionne de gré à gré par l'intermédiaire d'une bourse, à laquelle toutes les firmes peuvent participer. Chaque transaction aura lieu à un prix qui résulte uniquement de la confrontation de l'offre et de la demande. Ce

nouvel instrument de contrôle de la pollution est souvent opposé à la taxe pigouvienne tant par sa conception théorique, son acceptabilité que par son application pratique ( réf. section 1.3).

Quelques années après, Montgomery (1972) reprend l'idée de Coase (1960) selon laquelle la définition de la propriété des biens peut conduire à l'optimum social et démontre que la mise en place d'un système de permis est équivalent à l'application d'une taxe d'émission en terme d'efficacité. Nous présenterons ce résultat ci-après en retenant les notations précédentes.

Formellement, le régulateur définit préalablement le nombre de permis  $l$  équivalent à la quantité globale de la pollution globale autorisée  $x$ . La dotation initiale de chaque firme  $i$  est notée  $l_i$ . Nous avons alors :

$$\begin{aligned} x &= l & (2.12) \\ &= \sum_i^n l_i \end{aligned}$$

Les permis d'émission seront ensuite mis en vente par le régulateur au prix  $p$ . Celui-ci s'assurera que chaque firme dispose de la quantité de permis lui permettant de couvrir ses émissions. Les firmes peuvent respecter leurs engagements vis-à-vis du régulateur de deux façons ; elles peuvent s'appuyer sur des technologies d'abattement de pollution ou acquérir des permis.

La firme prend le prix du permis comme une donnée et choisit le niveau de pollution et le volume de permis à acheter qui sont solution du programme de minimisation de ses coûts :

$$\begin{aligned} \min_{x_i, l_i} C^i(x_i) + p \cdot l_i & & (2.13) \\ \text{s.c. } x_i \leq l_i & \end{aligned}$$

Comme il est coûteux pour la firme d'acheter des permis, la contrainte est

saturée (i.e.,  $x_i = l_i$ ) et le problème s'écrit, après substitution comme suit :

$$\min_{x_i, l_i} C^i(x_i) + p \cdot x_i \quad (2.14)$$

La solution de ce programme est donnée par la CPO suivante :

$$l_i^*(p) \equiv x_i^*(p) : -C_{x_i}^i(x_i^*) = p \quad (2.15)$$

Cette égalité indique que la firme  $i$  émet de la pollution jusqu'au point d'égalité entre le gain marginal d'émission et le prix des permis. À l'équilibre, toutes les firmes égalisent leurs gains d'émission au prix du marché des permis (*cf.* section 2.2). Comme dans le cas de la taxe pigouvienne, nous déduisons de (2.11) que le prix du permis incitant les firmes à réduire leurs émissions au niveau agrégé  $x^*$  vérifie :

$$D_x(x^*) = n p^* \quad (2.16)$$

En conclusion, si le régulateur dispose de l'information parfaite sur le coût marginal de toutes les firmes, la régulation de la pollution par l'émission des PEN est aussi efficace que l'application de la taxe pigouvienne. L'efficacité d'un tel système est garantie à condition que le marché fonctionne en situation de concurrence parfaite (Montgomery, 1972).

### 2.2.3 Discussion

Nous venons de voir que la régulation de la pollution par la taxe ou par les permis d'émission négociables conduit à l'optimum social en cas d'information parfaite. Cependant, les permis et la taxe sont encore peu utilisés pour inciter réellement à réduire la pollution (*cf.* chapitre 1). Cette situation s'explique principalement par les problèmes d'asymétrie d'information qui accompagnent la mise en place de ces instruments (Weitzman, 1974). Généralement, le régulateur peut être alors contraint à fixer d'avance, par un choix politique, un niveau d'abattement qui n'est pas socialement acceptable

et à chercher à l'atteindre au moindre coût.

En pratique, le régulateur n'est pas omniscient et ne peut connaître gratuitement les coûts d'abattement des firmes. Toutefois, un échange itératif d'information entre la firme et le régulateur permet d'asseoir le taux de la taxe nécessaire pour atteindre le niveau d'abattement socialement acceptable. Cette solution suppose que l'environnement demeure infiniment inchangé ou encore que la vitesse de circulation de l'information entre le régulateur et la firme est infinie par rapport à celle des changements dans l'environnement (Freixas, 1981b). Ainsi, ce processus de tâtonnement peut être coûteux et peu envisageable, notamment s'il dure longtemps.

Par ailleurs, il s'avère que la taxe est plus appropriée pour les émetteurs de pollution dispersés, alors que les permis d'émission sont recommandés pour réguler la pollution des gros émetteurs de pollution (Philibert, 2003; Gastaldo, 2009). À l'inverse, l'adoption d'un système de permis d'émission négociables garantit l'objectif environnemental mais ne permet pas de contrôler le coût d'abattement (Weitzman, 1974; Baumol et Oates, 1988).

Nous avons vu dans cette sous-section, un résultat standard de la régulation de la pollution en information parfaite selon lequel la régulation par la taxe ou par le permis d'émission négociables conduit à l'optimum social. Mais qu'en est-il de l'équivalence de ces deux instruments lorsque l'information est imparfaite ?

En situation d'incertitude sur les caractéristiques des firmes, notamment sur leurs coûts marginaux d'abattement, les deux instruments de régulation de la pollution ne sont plus équivalents. En fait, dans le cas de l'application d'une taxe d'émission, l'objectif quantitatif d'émission n'est plus garanti alors qu'avec un marché de permis, le prix est difficile à prévoir et risque de s'envoler ou, au contraire, de chuter. Nous étudions dans la section suivante les conditions d'application de ces deux instruments lorsque le régulateur ne connaît pas parfaitement les coûts de dépollution des firmes. Nous procédons également à une comparaison détaillée de l'efficacité des deux instruments à

partir de l'analyse de Weitzman (1974).

## 2.3 Régulation de pollution en pratique :

### « *Prices vs. Quantities* »

Pour juger de l'utilité sociale d'instruments économiques, on utilise souvent une analyse coûts-avantages. Cette méthode consiste à comparer les avantages par rapport aux coûts. L'application de cette analyse en cas d'information imparfaite, sous l'hypothèse d'anticipations rationnelles<sup>1</sup>, consiste à comparer les espérances mathématiques des coûts à celles des bénéfices. Cette méthode a été utilisée par Weitzman dans le but de répondre à un objectif essentiel : réguler les émissions dans un environnement peu certain tout en commettant le moins d'erreurs possible. Pour ce faire, il compare l'effet d'application d'un instrument prix ou quantités lorsque l'information est imparfaite et identifie les conditions sous lesquelles l'un des deux instruments est supérieur à l'autre. Nous exposerons dans cette section son modèle fondateur et les principaux résultats qui en découlent<sup>2</sup>.

#### 2.3.1 Information parfaite

Considérons une économie simplifiée constituée d'un producteur représentatif (la firme), un consommateur représentatif, un bien quelconque et un régulateur. Pour illustrer, nous prenons l'exemple d'une station d'épuration qui produit de l'eau dépolluée dont bénéficie le consommateur à partir d'une source d'eau polluée. Et pour simplifier, nous supposons, comme dans la section 2.2, que le coût de production de la firme peut être séparé en un coût de production normalisé à zéro et un coût de dépollution qui dépend uniquement des émissions  $l$ , noté  $C(l)$ . La dépollution procure un bénéfice de  $B(l)$ . Il est supposé que  $B''(l) < 0$ ,  $C''(l) > 0$ ,  $B'(0) > C'(0)$  et  $B'(l) < C'(l)$  pour  $l$  suffisamment grande.

---

1. Selon cette hypothèse, les agents sont capables d'utiliser l'information disponible pour former leurs anticipations de façon qu'en moyenne, ils ne se trompent pas.

2. Nous ne reprenons pas les extensions de ce modèle dans cette thèse.

Dans ce cas qui est purement théorique, les trois agents de l'économie disposent de la même information. Le régulateur dont l'objectif est de réduire les émissions à  $l$ , observe parfaitement la fonction de coût de la firme. Ainsi, il imposera à cette dernière de choisir la quantité de pollution  $l^*$  qui maximise :

$$B(l) - C(l) \tag{2.17}$$

Cette solution doit satisfaire la condition de premier ordre suivante :

$$B_l(l^*) = C_l(l^*) \tag{2.18}$$

D'autre part, la firme choisit la quantité de pollution qui maximise son profit :

$$\max_l p l - C(l) \tag{2.19}$$

autrement dit la quantité qui vérifie :

$$p = C_l(l^*) \tag{2.20}$$

d'où de (2.18) et de (2.20), on déduit :

$$p = p^* \equiv B_l(l^*) = C_l(l^*) \tag{2.21}$$

Lorsque le régulateur connaît parfaitement les coûts d'abattement des firmes, il est équivalent pour lui d'annoncer  $p^*$  et laisser la firme maximiser son profit  $p^*l - C(l)$  ou de fixer  $l^*$  et inciter le producteur à maximiser  $p l^* - C(l^*)$ . Cette équivalence n'est plus vérifiable en cas d'incertitude sur le coût d'abattement.

### 2.3.2 Incertitude sur le coût

En pratique, le régulateur conçoit la politique environnementale visant à réduire la pollution dans des conditions incertaines. Adar et Griffin (1976) font la différence entre des incertitudes qui peuvent se manifester auprès des firmes et celles qui surgissent auprès du régulateur. Au niveau de la firme, certaines actions du régulateur comme le changement fréquent des taux de la taxe peuvent constituer une source d'incertitude pour la firme. Quant au régulateur, il fait face à plusieurs types d'incertitudes qui peuvent être globalement résumés en deux types<sup>1</sup>. Le premier est lié à l'ampleur et le rythme de concentration des émissions ainsi que les éventuelles conséquences de la pollution sur l'environnement. Ces incertitudes d'ordre scientifique persistent malgré les efforts considérables qui sont déployés durant ces dernières décennies<sup>2</sup>. L'autre type d'incertitude concerne les coûts marginaux des technologies de dépollution adoptées par les firmes. Ces technologies peuvent être insuffisamment prouvées ou si récentes qu'il est difficile de prévoir les économies d'échelles qui seront réalisées et la vitesse d'apprentissage ou de diffusion.

Nous nous limitons aux incertitudes sur les coûts de dépollution et supposons que les firmes connaissent parfaitement leur fonction de coût d'abattement. Au contraire, le régulateur connaît mal les coûts de dépollution des firmes ; il n'en connaît qu'une estimation sous forme d'une loi de probabilité. Ainsi, l'expression « l'incertitude sur le coût de dépollution » désigne, le long de cette thèse l'incertitude due à la connaissance asymétrique des coûts de dépollution des firmes. Cette incertitude ne doit pas être confondue avec le problème d'antisélection que nous allons traiter dans le chapitre 4. En fait, dans le cas de l'antisélection, le régulateur connaît parfaitement les coûts de dépollution possible dans le secteur des firmes étudiées mais il a une incertitude concernant leur type (il ne sait pas qui fait quoi).

---

1. Rotillon (1981, p. 295) retient le classement de l'incertain en deux grandes catégories : la première est indépendante de l'activité humaine qualifiée « d'incertitude naturelle » l'autre catégorie porte sur le coût, qualifiée « d'incertitude économique ».

2. Nous citons comme exemple le travail d'évaluation des risques liés au changement climatique fait par le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat (GIEC).

Puisqu'il est assez naturel que le régulateur soit incertain quant à la spécification précise des fonctions des coûts et des bénéfices, la fonction de coût  $C(x, \theta)$  dépend désormais d'une variable  $\theta$  qui reflète les modifications de cette fonction survenues au jour le jour. Il est supposé que la valeur de  $\theta$  est parfaitement connue par la firme, mais que le régulateur ne l'observe pas *ex ante* et n'en connaît que l'espérance,  $E_\theta[C(x, \theta)]$ .

Il en est de même pour la fonction de bénéfice  $B(x, \eta)$  qui dépend d'une variable aléatoire  $\eta$ . Cette fonction est connue de la firme et du consommateur mais le régulateur l'ignore et n'en connaît que l'espérance  $E_\eta[B(x, \eta)]$ . Notons aussi que les facteurs qui influent la fonction de coût ne sont pas forcément les mêmes que ceux qui influent la fonction de bénéfice. Il est supposé que les deux variables  $\theta$  et  $\eta$  sont indépendamment distribuées.

Le problème du régulateur est de choisir le niveau de production qui maximise l'espérance de bénéfice nette des coûts, alors que la firme cherche à maximiser son profit. L'application d'un instrument idéal de régulation des émissions dépend de  $\theta$  et  $\eta$ . Ainsi, la quantité optimale  $x^*(\theta, \eta)$  et le prix  $p^*(\theta, \eta)$  *ex ante* permettant de concevoir cet instrument satisfont :

$$\begin{aligned} B_x(x^*(\theta, \eta), \eta) &= C_x(x^*(\theta, \eta), \theta) \\ &= p^*(\theta, \eta) \end{aligned} \tag{2.22}$$

Or, dans le contexte d'incertitude, il serait logique de parler des solutions de second rang. Ainsi, supposons que le régulateur devrait décider de la quantité de pollution, il imposerait à la firme d'émettre la quantité  $\hat{x}$  telle que :

$$\hat{x} = \operatorname{argmax}_x E[B(x, \eta) - C(x, \theta)] \tag{2.23}$$

La quantité  $\hat{x}$  satisfait la CPO suivante :

$$E\left[B_x(\hat{x}, \eta)\right] = E\left[C_x(\hat{x}, \theta)\right] \quad (2.24)$$

Or, le régulateur peut atteindre cet objectif en se limitant à annoncer seulement un système de prix à la firme. Celle-ci réagira par le choix de son niveau effectif de pollution :

$$x = h(p, \theta)$$

qui maximise son profit à  $p$  et  $\theta$  donnés. Autrement, elle choisit son niveau effectif de pollution tel que le prix annoncé soit égal à son coût marginal, alors :

$$\left[p h(p, \theta) - C(h(p, \theta), \theta)\right] = \max_x \left[p x - C(x, \theta)\right] \quad (2.25)$$

Cette quantité qui dépend du prix et de la valeur prise par  $\theta$  vérifie :

$$C_x(h(p, \theta), \theta) = p \quad (2.26)$$

Si le régulateur est rationnel, il choisira l'instrument de prix  $\check{p}$  qui maximise la différence espérée entre le bénéfice et le coût compte tenue de la fonction de réaction  $h(p, \theta)$  :

$$E\left[B\left(h(\check{p}, \theta), \eta\right) - C\left(h(\check{p}, \theta), \theta\right)\right] = \max_p E\left[B\left(h(p, \theta), \eta\right) - C\left(h(p, \theta), \theta\right)\right]$$

Ce prix  $\check{p}$  satisfait la CPO :

$$E\left[B_x\left(h(\check{p}, \theta), \eta\right) \cdot h_p(\check{p}, \theta)\right] = E\left[C_x\left(h(\check{p}, \theta), \eta\right) \cdot h_p(\check{p}, \theta)\right] \quad (2.27)$$

d'où :

$$\check{p} = \frac{E \left[ B_x(h(\check{p}, \theta), \eta) \cdot h_p(\check{p}, \theta) \right]}{E \left[ h_p(\check{p}, \theta) \right]} \quad (2.28)$$

qui est le prix optimal  $\check{p}$  choisit *ex ante* par le régulateur. Il correspond à la quantité d'émission *ex-post*  $\check{x}$  exprimée en fonction de  $\theta$  comme suivant :

$$\check{x}(\theta) \equiv h(\check{p}, \theta) \quad (2.29)$$

La quantité  $\check{x}$  dépend de  $\theta$  et, par conséquent, elle est *a priori* inconnue du régulateur.

En présence de l'incertitude, les instruments de prix et de quantité agissent de manières tout à fait différentes. En fait, les valeurs de  $\theta$  et  $\eta$  ne sont pas connues, au moins pour un moment donné. Pendant ce temps, et avant que ces valeurs ne soient connues par leurs effets, les firmes continuent d'émettre  $\hat{x}$ . Ainsi,

$$B_x(\hat{x}, \eta) \neq C_x(\hat{x}, \theta) \quad \text{et} \quad B_x(\check{x}, \eta) \neq C_x(\check{x}, \theta)$$

Aucun des deux instruments ne permet d'atteindre un optimum *ex post*. La question qui s'impose est : lequel de ces deux moyens en est le plus proche ? Et, le cas échéant, dans quelles circonstances ? L'analyse menée par Weitzman permet de comparer l'efficacité des deux mécanismes.

### 2.3.3 Analyse de Weitzman et principaux résultats

Afin de savoir s'il est mieux d'employer un mécanisme en quantités ou en prix pour réguler les émissions, l'auteur a calculé l'avantage comparatif de l'instrument prix par rapport à l'instrument quantité, noté  $\Delta$ . Il correspond à la différence entre les espérances de bénéfice nettes des coûts des deux mécanismes :

$$\Delta = E \left[ \left( B(\check{x}(\theta), \eta) - C(\check{x}(\theta), \theta) \right) - \left( B(\hat{x}, \eta) - C(\hat{x}, \theta) \right) \right] \quad (2.30)$$

Supposons que l'incertitude ne porte que sur le coût et le bénéfice marginaux. L'incertitude est supposée être suffisamment faible pour justifier une approximation de second rang des fonctions de coût et de bénéfice. Soit le symbole «  $\overset{\circ}{\approx}$  » utilisé pour exprimer une « approximation locale » de sorte que les fonctions de coût et de bénéfice ont une forme quadratique au voisinage de  $x = \hat{x}$ . L'indice  $\Delta$  peut être développé en utilisant le développement limité des fonctions de bénéfice  $B$  et de coût  $C$  à l'ordre 2 en  $x$ .

On a :

$$C(x, \theta) \overset{\circ}{\approx} a(\theta) + \left[ C_x + \alpha(\theta) \right] (x - \hat{x}) + \frac{1}{2} C_{xx} \cdot (x - \hat{x})^2 \quad (2.31)$$

$$B(x, \theta) \overset{\circ}{\approx} b(\eta) + \left[ B_x + \beta(\eta) \right] (x - \hat{x}) + \frac{1}{2} B_{xx} \cdot (x - \hat{x})^2 \quad (2.32)$$

leurs dérivées premières respectives par rapport à  $x$  sont :

$$\frac{\partial C}{\partial x}(x, \theta) \overset{\circ}{\approx} C_x + \alpha(\theta) + C_{xx} \cdot (x - \hat{x}) \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial B}{\partial x}(x, \eta) \overset{\circ}{\approx} B_x + \beta(\eta) + B_{xx} \cdot (x - \hat{x}) \quad (2.34)$$

avec  $\alpha(\theta)$  (resp.  $\beta(\eta)$ ) une fonction de la variable aléatoire  $\theta$  (resp.  $\eta$ ) mesurant la variation du coût (resp. bénéfice) marginal au point  $\hat{x}$ .

**Proposition 2.1 (Weitzman 1974)**

*L'expression de l'avantage comparatif des prix sur les quantités peut être écrite comme :*

$$\Delta \overset{\circ}{\approx} \frac{\sigma^2(B_{xx} + C_{xx})}{2C_{xx}^2} \quad (2.35)$$

où  $C_{xx}$  est la pente de la fonction de coût marginal,  $B_{xx}$  est la pente de la fonction de bénéfice marginal et  $\sigma^2$  est la variance du coût marginal. Le signe de  $\Delta$  est celui de  $C_{xx} + B_{xx}$  et  $\Delta$  dépend linéairement du carré de l'erreur moyenne du coût marginal.

**Pour la preuve de la proposition 2.1, (voir annexe B).**

L'expression (2.35) constitue le résultat fondamental de Weitzman (1974). Comme le régulateur peut commettre des erreurs d'estimation sur les bénéfices ou sur les coûts, il est naturel que la différence d'efficacité entre les mécanismes en prix et en quantités,  $\Delta$ , dépende des pentes des courbes du coût marginal et de bénéfice marginal. Ainsi, une pente forte de la courbe du coût marginal (i.e. la valeur absolue de  $C_{xx}$  est plus importante que celle de  $B_{xx}$ ) signifie que la courbe de dommage augmente rapidement avec la quantité de pollution. Dans ce cas, une petite erreur sur le niveau de pollution aura des conséquences importantes sur l'environnement. Ainsi, il vaut mieux de décider de la quantité de pollution que de risquer un dommage extrêmement élevé. À l'inverse, si les dommages marginaux sont peu sensibles au niveau de pollution (la courbe est proche de l'horizontal), le dommage s'accroît lentement avec le niveau de pollution. Dans ce cas, il est judicieux de fixer le prix des émissions au risque de payer plus cher pour un bénéfice supplémentaire faible.

Dans le cas où l'on risque un dommage très important, l'adoption d'un instrument des quantités est préférable, alors qu'un instrument des prix est prescrit lorsque ce risque est faible, notamment lorsque les allocations-prix coïncident avec les allocations optimales ( $B_{xx} = 0$ ).

Comme le mécanisme en prix utilise l'information fournie par les firmes à travers leurs demandes, celui-ci aboutit à une espérance de bénéfice supérieure à un mécanisme de quantité. Or, cela ne paraît pas dans le résultat ci-dessus. Ce résultat s'explique selon Freixas (1981a) par le fait que l'information supplémentaire fournie par le mécanisme de prix est mal utilisée à cause de l'« hypersensibilité » des allocations aux prix. En effet, ces al-

locations sont toujours positivement corrélées avec l'optimum mais restent trop loin de l'allocation  $\hat{x}$ . La firme réagit en considérant uniquement un prix constant, et comme le bénéfice marginal est une fonction décroissante des quantités, les réactions de la firme aux changements de ses coûts sont toujours soit trop fortes (si  $\alpha(\theta) > 0$ ), soit trop faibles (si  $\alpha(\theta) < 0$ ); sauf dans le cas où ces allocations sont optimales ( $B_{xx} = 0$ ).

Dans le mécanisme des quantités, les firmes produisent les quantités de production demandées par le régulateur quelque soit le coût. Ces quantités sont celles qui maximisent l'espérance d'utilité collective. Ainsi, ce mécanisme n'utilise pas l'information des firmes et l'allocation est déterminée uniquement sur la base des *a priori* du régulateur sur ces firmes.

La comparaison de la structure des deux mécanismes révèle que le mécanisme<sup>1</sup> des quantités correspond à la troisième étape du mécanisme des prix. En effet, avec un mécanisme des prix, le régulateur annonce aux firmes un système des prix. Ensuite, les firmes réagissent par le biais de leur demande. Enfin, le régulateur, qui est désormais informé de la demande des firmes, alloue les permis. Ainsi, le système prix pourrait être préférable au système des quantités (Marschak et Miyasawa, 1968; Marschak et Radner, 1971) puisque ce dernier offre moins d'information au régulateur que le mécanisme des prix. La supériorité du système prix dépend en fait de la qualité de l'information contenue dans la demande transmise par les firmes au régulateur à la deuxième étape. Cette information permet de mieux connaître les caractéristiques des firmes. Toutefois, l'allocation réalisée n'a pas de lien direct avec les demandes exprimées par les firmes. Pour que les demandes constituent la base de l'allocation réalisée, on devrait vérifier dans la troisième étape, deux hypothèses supplémentaires introduites par Freixas (1981b) : la première stipule que lorsque les prévisions du régulateur sont vérifiées, le marché des permis est équilibré et les firmes reçoivent les quantités qu'elles ont demandées, alors que selon la deuxième, tout accroissement de la demande d'une firme entraîne un accroissement de la quantité de permis qui lui est allouée.

---

1. Freixas (1981b) considère des quasi-mécanismes de prix et de quantité pour éviter que le mécanisme conduise à des allocations non réalisables.

Selon l'auteur, ces deux hypothèses suffisent à différencier complètement les mécanismes de prix et quantité.

Finalement, Weitzman (1974) et, avant lui, Baumol (1972) expliquent analytiquement pourquoi il existe une différence d'efficacité entre un système pur en prix et un système pur en quantités lorsque l'information imparfaite. Cependant, ils ne proposent pas explicitement de solution alternative à l'emploi de l'un ou de l'autre de ces systèmes lorsqu'ils se révèlent être inefficaces. Leur analyse va inspirer Roberts et Spence (1976) qui proposent un système hybride. Ce système qui implique à la fois le paiement d'une taxe et une limitation d'émission par des permis négociables est préférable, sous certaines conditions, à l'application de la taxe d'émission pure ou l'application de permis pur.

## 2.4 Taxe et permis en situation d'incertitude sur le coût de dépollution

Dans un cadre statique, Roberts et Spence (1976) ont conçu un modèle combinant les deux instruments, taxe et permis, dans un système hybride. 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 les coûts estimés par le régulateur, entraînant un manque de permis sur le marché, le régulateur autorise alors les firmes à polluer au-delà de leurs dotations initiales moyennant une taxe. Au contraire, celui-ci achète le surplus de dépollution en échange d'une subvention si les coûts sont plus faibles que prévu. Étant donné sa souplesse, ce système permet de basculer des permis vers la taxe évitant, par conséquent, d'avoir une montée ou une chute du prix de permis (il sert de soupape de sécurité). En fait, le régulateur dispose de trois variables pour prendre sa décision à savoir les émissions, la taxe et la subvention. Ce système est supérieur au système taxe ou marché et ces deux cas constituent des cas particuliers du système hybride.

### 2.4.1 Régulation de pollution par combinaison d'instruments

Nous reprenons les notations introduites précédemment et rappelons que le cas traité est toujours celui d'une situation d'incertitude sur les coûts. Nous employons  $\theta$  pour paramétrer l'incertitude sur le coût de dépollution. Cette incertitude est supposée porter sur le secteur pris dans son ensemble, c'est-à-dire que la même incertitude porte sur toutes les firmes. Ainsi, les coûts de dépollution, individuel et global, notés auparavant  $C^i(x_i)$  et  $C(x)$ , deviennent respectivement  $C^i(x_i, \theta)$  et  $C(x, \theta)$ . Il est supposé également que  $C_\theta > 0$  et que  $C_{x\theta} < 0$ . Ce qui signifie que lorsque  $\theta$  varie, les coûts absolus et marginaux varient dans le même sens que  $x$ .

Le coût  $C^i(x_i)$  représente la réduction du profit total. La dépollution peut être accompagnée des changements des niveaux des intrants et des sortants de la firme. Nous retenons l'hypothèse du chapitre 2 selon laquelle la baisse des profits reflète exactement le coût social de dépollution, qui peut s'avérer correct si les marchés sont concurrentiels.

Le coût de pollution total  $C(x, \theta)$  est la somme des coûts individuels des firmes. Nous précisons qu'à chaque fois que nous écrivons  $C$ , nous nous référons, comme il a été le cas dans la section 2.2, seulement à des circonstances où la dépollution est distribuée entre les firmes de façon à minimiser le coût. Ainsi, nous aurons par définition :

$$C(x, \theta) = \sum_{i=1}^n C^i(x_i, \theta) \quad (2.36)$$

Selon le système proposé par R&S, le régulateur émet une quantité finie de permis  $l$  qu'il vend aux firmes sur un marché. La firme  $i$  peut acquérir une quantité de permis  $l_i$  pour pouvoir émettre des polluants. Une subvention unitaire  $s$  est versée aux firmes pour chaque permis non utilisé. À l'inverse, la firme peut être autorisée à émettre plus de polluant, moyennant une taxe unitaire  $t$ , s'il s'avère que la quantité de permis qu'elle détient ne lui permet

pas de couvrir la totalité de ses émissions. Taxes et subventions seront ainsi mobilisées si l'allocation totale  $l$  en permis ne correspond pas à l'allocation socialement optimale du fait d'une mauvaise estimation des coûts d'abattement des firmes. Ainsi, si les coûts sont surestimés, la subvention fournit une incitation supplémentaire à la dépollution. En revanche, si les coûts réels s'avèrent plus élevés que ceux estimés, la taxe peut éviter une flambée du prix des permis.

Le problème du régulateur est de choisir un système de régulation de la pollution qui minimise les coûts totaux espérés avec  $f(\theta)$  la fonction de densité de  $\theta$ . Les coûts totaux espérés sont :

$$\begin{aligned} T &= \int [D(x) + C(x, \theta)] f(\theta) d\theta \\ &= E[D(x) + C(x, \theta)] \end{aligned} \quad (2.37)$$

Soit  $p$  le prix de marché des permis. Il est déterminé par confrontation de la demande et de l'offre en permis sur le marché des permis. D'après ce système, la firme  $i$  a le choix entre dépolluer en utilisant sa propre technologie ou acquérir des permis auprès du régulateur au prix  $p$ . Une taxe ou une subvention est prévue lorsque la quantité de permis acquis ne correspond pas exactement aux besoins de la firme en émission de polluant. Ainsi, le coût total de la firme, noté  $CT^i$ , s'écrit comme :

$$CT^i = \begin{cases} C^i(x_i, \theta) + p l_i - s(l_i - x_i) & \text{si } x_i \leq l_i & (*) \\ C^i(x_i, \theta) + p l_i + t(x_i - l_i) & \text{si } x_i \geq l_i & (**) \end{cases}$$

La firme  $i$  choisit  $x_i$  et  $l_i$  qui minimisent ce coût. À l'équilibre, nous avons :

$$\sum_{i=1}^n l_i = l$$

Le marché des permis ne s'ouvre qu'une seule fois pour distribuer l'allocation initiale en permis. Une fois cette allocation choisie, le marché se ferme et aucun échange ne sera possible ensuite.

Étudions maintenant les propriétés de l'équilibre :

Supposons que  $p < s$ . Selon (\*) les firmes peuvent acheter infiniment des permis au prix  $p$  pour les revendre au régulateur en contrepartie de  $s$ , ( $CT_{l_i}^i < 0$ , et  $l_i(p) = \infty$ ). Ainsi, l'équilibre ne peut exister dans ce cas.

Mais si nous supposons que  $p > t$ , alors d'après (\*\*) les firmes opteront pour le paiement de la taxe  $t$  et n'achèteront pas de permis sur le marché au prix  $p$ , ( $CT_{l_i}^i > 0$ , et  $l_i(p) = 0$ ). L'équilibre ne peut pas non plus exister dans ce cas aussi.

Par conséquent, l'équilibre est tel que  $s \leq p \leq t$ .

Dans l'étape suivante, on montre qu'à l'optimum  $C_x^i(x_i, \theta)$  est toujours égale à  $-p$  quelque soit  $i$ . Autrement dit, les choix individuels des firmes en matière d'émission (et donc de dépollution) sont tels que tous leurs coûts marginaux de dépollution sont égaux entre eux.

À l'équilibre, le coût d'abattement diffère selon les trois cas suivants :

**1. Cas où  $p = s$  :**

Dans ce cas, la firme peut toujours échanger des permis non utilisés contre une subvention au même prix que celui du permis. Ainsi, la quantité de permis achetée par la firme est telle que  $x_i \leq l_i$ ; et la firme dépolluera jusqu'à ce que son coût d'abattement marginal égalise le prix du permis, c'est-à-dire si :

$$\begin{aligned} C_{x_i}^i(x_i, \theta) &= -s \\ &= -p \end{aligned}$$

**2. Cas où  $s < p < t$  :**

La firme choisit d'acheter la quantité de permis couvrant exactement son besoin en émission ;  $x_i = l_i$  car i) si elle émettait plus, elle aurait à acheter des droits supplémentaire au prix  $t > p$ , ii) si elle émettait moins, elle ne récupérerait que  $s < p$  pour chaque permis non utilisé. Ainsi, d'après ((\*), (\*\*)), la firme dépolluera jusqu'à ce que son coût d'abattement égale le prix du permis :

$$C_{x_i}^i(x_i, \theta) = -p$$

**3. Cas où  $p = t$  :**

La firme ne paie pas de prix supplémentaire sur ses émissions dépassant son allocation achetée en permis : on a alors  $x_i \geq l_i$ . Ainsi, elle devrait être indifférente entre acheter des permis ou payer une taxe tant qu'elle émet plus que ce que lui autorise son allocation en permis. Elle dépolluera jusqu'à ce que son coût d'abattement marginal égale le prix du permis et le taux de la taxe :

$$\begin{aligned} C_{x_i}^i(x_i, \theta) &= -t \\ &= -p \end{aligned}$$

Dans ces trois cas, l'optimum est tel que  $C_{x_i}^i(x_i, \theta) = -p$  pour toute firme  $i$ . Ainsi, on aura finalement :

$$C_x^i(x_i, \theta) = C_x^j(x_j, \theta); \quad \forall i, j$$

La dépollution est alors efficacement distribuée entre les pollueurs. Et finalement, comme dans la section 2.2, le contrôle de la pollution sera assuré au moindre coût :

$$C_x(x, \theta) = -p \quad (2.38)$$

Maintenant, nous allons voir comment le niveau  $x$  est déterminé en fonction de  $p$  et  $s$ . Trois cas sont envisageables :

D'abord, si  $s < p < t$ , alors  $x_i = l_i$  pour tout  $i$ , d'où  $x = l$ . La condition (2.38) devient alors :

$$s < -C_x(l, \theta) = p < t \quad (2.39)$$

Cette inégalité sera notamment vérifiée pour les types de firmes à coûts marginaux de dépollution  $-C_x$  intermédiaires.

Ensuite, si les coûts de dépollution sont très élevés, alors le prix des permis  $p$  sera amené au niveau de la taxe  $t$ . À ce point, nous avons vu que les émissions dépasseront la quantité de permis :  $x > l$ . À l'équilibre nous avons  $C_x(x, \theta) + t = 0$  et  $C_x(l, \theta) + t < 0$ .

Enfin, si les coûts sont faibles, de sorte que  $C_x(l, \theta) + s > 0$ , alors  $x < l$  et  $p = s$ . Le niveau d'émission réellement atteint est donné par  $C_x(x, \theta) + s = 0$ .

Ces résultats peuvent être résumés dans la proposition suivante :

**Proposition 2.2**

*En résumé, l'application d'une combinaison taxe-permis donne lieu à trois équilibres possibles et permet, comme le montre la figure 2.2, une auto-sélection des firmes en trois types :*

- i) Une firme de type  $\theta_B$  dont la quantité d'émission est au-dessous de son allocation en permis  $x_i < l_i$  et dont le coût marginal d'abattement est inférieur au taux de la subvention.*
- ii) Une firme de type  $\theta_H$  dont les émissions ne sont pas totalement couvertes par son allocation en permis  $x_i > l_i$  et qui a un coût marginal d'abattement supérieur au taux de la taxe.*

- iii) Une firme de type  $\theta_I$  dont l'allocation en permis couvre exactement ses émissions  $x_i = l_i$ ; son coût marginal d'abattement est borné par le taux de subvention et par celui de la taxe.

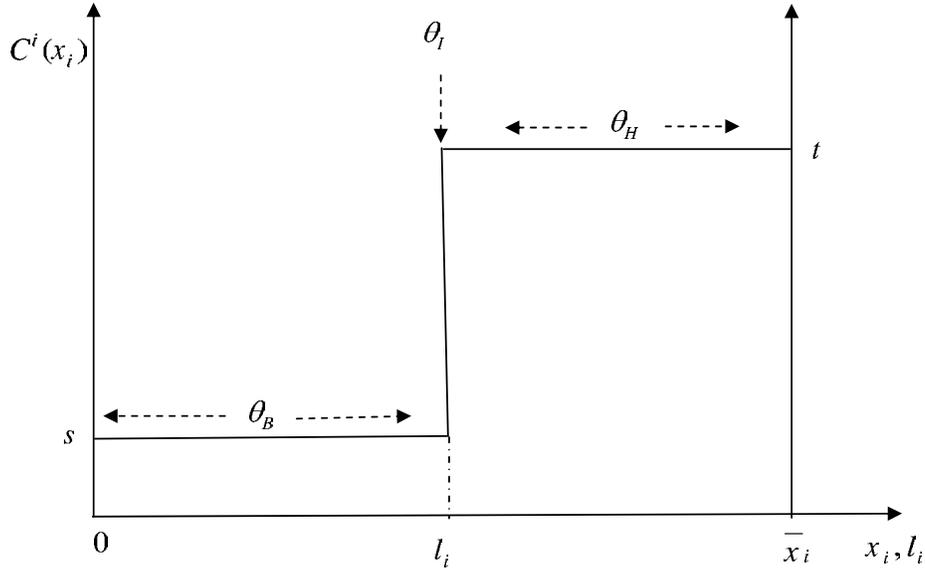


FIGURE 2.2 – Auto-sélection des firmes en trois types

Finalement, R&S montrent encore que ce système hybride permet d'avoir le même niveau d'émission que celui qu'on peut obtenir si la dépollution est centralisée (fusion des firmes) et si la firme représentative fait face à une fonction de pénalité linéaire par morceaux  $P(x)$  qui a la forme :

$$P(x) = s x + t \max(x - l, 0) \quad (2.40)$$

En réponse à cette fonction, la firme réagit par la minimisation de la fonction de coût suivante :

$$\min_x P(x) + C(x, \theta) \quad (2.41)$$

Ainsi, elle choisit son niveau de pollution tel que  $x$  :

$$\left\{ \begin{array}{ll} x = l & \text{si } s < -C_x(l, \theta) < t \\ -C_x(x, \theta) + s = 0 \text{ et } x < l & \text{si } -C_x(l, \theta) < s \\ -C_x(x, \theta) + t = 0 \text{ et } x > l & \text{si } -C_x(l, \theta) > t \end{array} \right. \quad (2.42)$$

Le système hybride se réduit à un système pure taxe si  $s = t$ , et à un système pur permis si  $s = 0$  et  $t = +\infty$ . Comme les deux systèmes taxe et permis constituent des cas particuliers du système hybride, ce dernier permet d'approcher le plus possible le niveau optimal que les autres deux systèmes. Par conséquent, il leur est logiquement supérieur.

En outre, ce système permet d'approximer la fonction du dommage es-  
 péré  $D(x)$  par une fonction de pénalité linéaire par morceaux (fig.2.3). On  
 peut voir le même résultat dans (fig.2.4) où ce système approxime cette fois  
 le dommage marginal par une fonction en escalier.

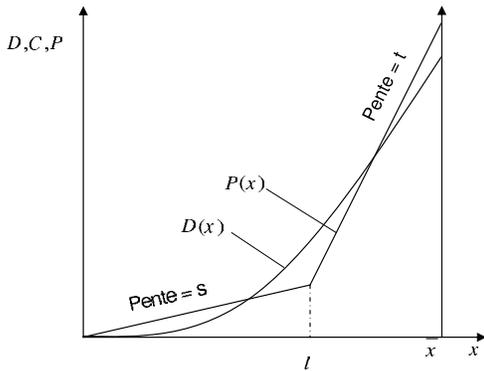


FIGURE 2.3 – Fonction linéaire par morceaux. *Source* : R&S p.199

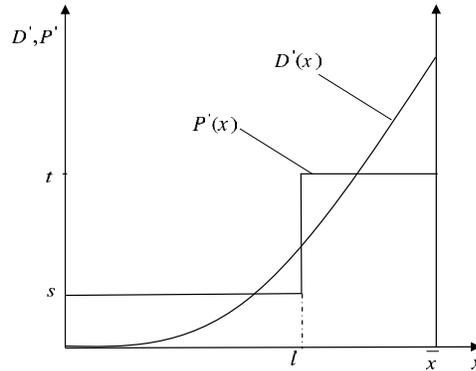
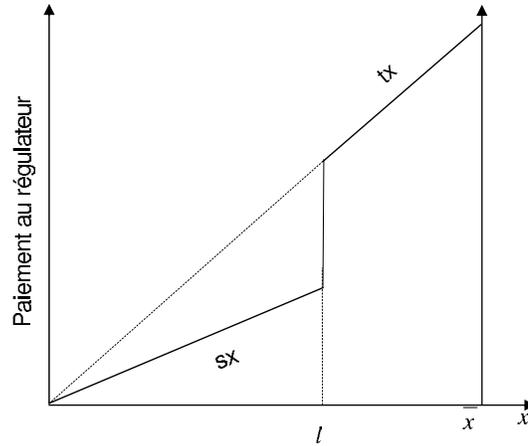


FIGURE 2.4 – Fonction en escalier. *Source* : R&S p.199

FIGURE 2.5 – Fonction de paiement. *Source* : R&S p.200

La fonction de pénalité  $P(x)$  ne correspond pas exactement au paiement de la firme. Le paiement effectif de celle-ci dépend de  $\theta$  et pas uniquement du niveau final d'émission  $x$ . Ainsi, comme illustré sur la figure (fig.2.5), la firme reçoit du régulateur une subvention  $s$  par unité si les coûts sont plus faibles que prévus ( $x < l$ ) et paie à celui-ci une taxe  $t$  par unité si les coûts sont plus élevés que prévus ( $t > l$ ).

Le régulateur peut se tromper d'estimation du coût d'abattement des firmes mais avec ce système on arrive à approximer la fonction de dommage sans connaître les vrais types de firmes. Rappelons qu'il ne s'agit pas d'un problème d'antisélection où les types sont sensés être parfaitement connus, ici le régulateur connaît mal ces types.

### 2.4.2 Problème d'optimisation du régulateur

Le régulateur dispose de trois variables de décision à savoir :  $s$ ,  $p$  et  $l$ . Son objectif est de minimiser le coût social espéré de la pollution qui est constitué du dommage causé par les émissions et du coût de dépollution. Pour des niveaux donnés de ces trois variables, on aura deux niveaux critiques du coût déterminés par différents paramètres  $\theta$ . Le premier,  $\theta_1$ , est tel que :

$$C_x(l, \theta_1) + s = 0 \quad (2.43)$$

Dans ce cas, le coût d'abattement marginal est égal à la subvention d'émission quand  $x = l$ . Le deuxième  $\theta_2 > \theta_1$  est défini par :

$$C_x(l, \theta_2) + p = 0 \quad (2.44)$$

Ici, le coût marginal est assez élevé pour que les émissions excèdent l'allocation en permis.

Soit  $[0, b]$  le support de la distribution  $f(\theta)$ . Nous définissons  $x_1(\theta, s)$  et  $x_2(\theta, t)$  par :

$$C_x(x_1(\theta, s), \theta) + s = 0 \quad (2.45)$$

et

$$C_x(x_2(\theta, t), \theta) + t = 0 \quad (2.46)$$

Dérivons (2.45) par rapport à  $s$ , nous trouvons :

$$\frac{d^2C(x_1(\theta, s), \theta)}{dx^2} \cdot \frac{dx_1(x_1(\theta, s), \theta)}{ds} + 1 = 0 \quad (2.47)$$

et dérivons aussi (2.46) par rapport à  $t$ , nous trouvons :

$$\frac{d^2C(x_2(\theta, t), \theta)}{dx^2} \cdot \frac{dx_2(x_2(\theta, t), \theta)}{dt} + 1 = 0 \quad (2.48)$$

Par ailleurs, le coût total espéré de la dépollution est :

$$T(s, t, l) = \int_0^{\theta_1} \left[ D(x_1(\theta, s)) + C(x_1(\theta, s), \theta) \right] f(\theta) d\theta \quad (2.49)$$

$$+ \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left[ D(l) + C(l, \theta) \right] f(\theta) d\theta \quad (2.50)$$

$$+ \int_{\theta_2}^b \left[ D(x_2(\theta, t)) + C(x_2(\theta, t), \theta) \right] f(\theta) d\theta \quad (2.51)$$

Ce coût espéré est minimisé lorsque les dérivées partielles  $T_s$ ,  $T_t$  et  $T_l$  s'annulent, où lorsque les conditions suivantes se vérifient :

$$T_s = E \left[ D_s(x_1(\theta, s)) + C_s(x_1(\theta, s), \theta) \mid \theta \leq \theta_1 \right] = 0 \quad (2.52)$$

$$T_l = E \left[ D_l(l) + C_l(l, \theta) \mid \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \right] = 0 \quad (2.53)$$

$$T_t = E \left[ D_t(x_2(\theta, t)) + C_t(x_2(\theta, t), \theta) \mid \theta \geq \theta_2 \right] = 0 \quad (2.54)$$

Développons ces conditions :

$$E \left[ D'(x_1(\theta, s)) \cdot \frac{\partial x_1}{\partial s}(\theta, s) + C_x(x_1(\theta, s), \theta) \cdot \frac{\partial x_1}{\partial s}(\theta, s) \mid \theta \leq \theta_1 \right] = 0 \quad (2.55)$$

$$E \left[ D'(l) + C_x(l, \theta) \mid \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \right] = 0 \quad (2.56)$$

$$E \left[ D'(x_2(\theta, t)) \cdot \frac{\partial x_2}{\partial t}(\theta, t) + C_x(x_2(\theta, t), \theta) \cdot \frac{\partial x_2}{\partial t}(\theta, t) \mid \theta \geq \theta_2 \right] = 0 \quad (2.57)$$

Remplaçons (2.47 et (2.45)) (resp.(2.47) et (2.46)) dans (2.58) (resp.(2.60)), nous trouvons enfin les conditions suivantes :

$$E \left[ \frac{D'(x_1) - s}{C_{xx}(x_1, \theta)} \mid \theta \leq \theta_1 \right] = 0 \quad (2.58)$$

$$E \left[ D'(l) + C_x(l, \theta) \mid \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \right] = 0 \quad (2.59)$$

$$E \left[ \frac{D'(x_2) - t}{C_{xx}(x_2, \theta)} \mid \theta \geq \theta_2 \right] = 0 \quad (2.60)$$

Si l'information sur le coût total était parfaite, le régulateur pourrait fixer

le niveau agrégé de pollution  $x^*(\theta)$  qui vérifie :

$$D_x(x^*) + C_x(x^*, \theta) = 0; \quad \forall \theta \quad (2.61)$$

Si l'information est imparfaite, il ne peut implémenter qu'un niveau  $\hat{x}(\theta)$ , obtenu avec un système hybride optimal.

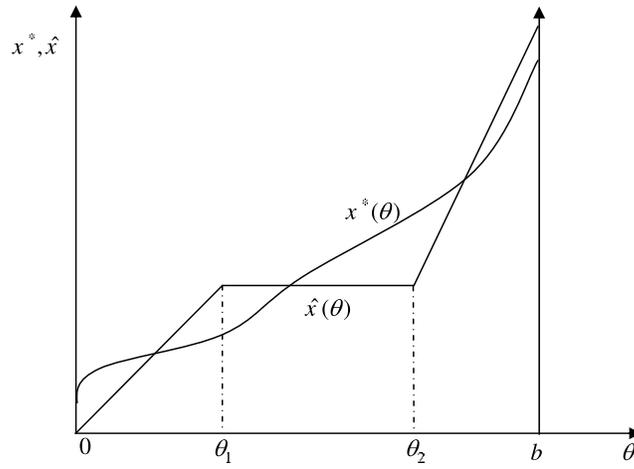


FIGURE 2.6 – Relation entre  $x^*(\theta)$  et  $\hat{x}(\theta)$ . Source : RBS p.201

Les conditions (2.58 à 2.60) constituent les conditions optimales pour des systèmes pure taxe ou pur permis sur chacun des trois intervalles. Ainsi, la condition (2.58), par exemple, décrit le système de subvention d'émission optimale lorsque les coûts varient sur l'intervalle  $[0, \theta_1]$ . La courbe représentant ce système coupe la courbe  $x^*(\theta)$  une seule fois. Par conséquent, la courbe  $x^*(\theta)$  coupe celle de  $\hat{x}(\theta)$  une fois dans chacun des intervalles.

Rappelons, comme il a été démontré dans la section (2.4), qu'en présence d'incertitudes sur les coûts de dépollution, la taxe et le permis incitent différemment à la dépollution. En fait, un système taxe incite à une dépollution excessive lorsque les coûts sont plus faibles que prévus puisque la taxe est supérieure au dommage marginal ( $t > D'$ ) et incite donc à trop peu de dépollution lorsque les coûts sont élevés puisque la taxe est inférieure au dommage

marginal ( $t < D'$ ). Inversement, le système permis, qui est peu sensible aux variations des coûts de dépollution, se distingue par des propriétés contraires.

Au-delà de l'importance des coûts qui peuvent être plus élevés ou plus faibles que prévus, la supériorité du système hybride est due au fait qu'il permet d'atteindre un niveau de pollution plus proche du niveau optimal que celui qu'on pourrait avoir avec des systèmes taxe ou permis.

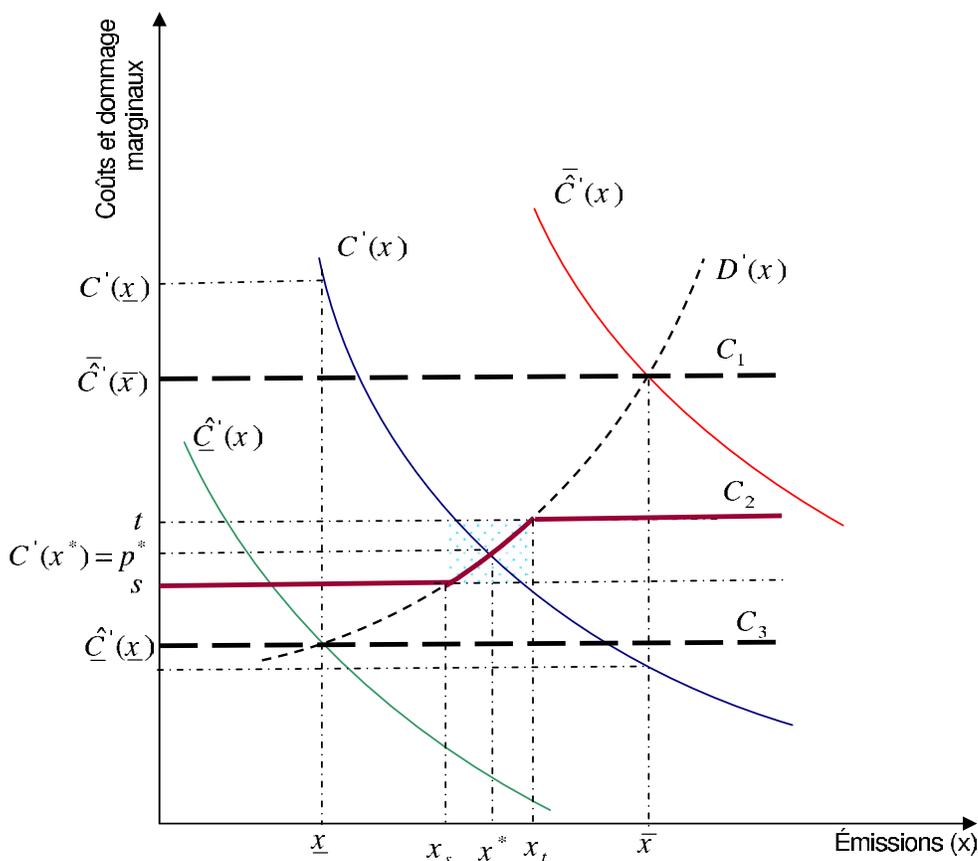


FIGURE 2.7 – Duplication de la fonction du dommage marginal par  $s$  et  $t$

À travers la présentation du modèle de R&S, nous avons montré qu'en situation d'incertitude sur le coût de dépollution, le système hybride permet d'encadrer le prix de marché des permis. Ce système permet de garantir un prix planché sous forme d'une subvention  $s$ , évitant ainsi l'effondrement du marché des permis. En même temps, ce système garantit un prix de permis

raisonnable à l'aide d'un prix plafond grâce à une pénalité  $t$ .

Ce système se ramène à un mécanisme de taxe si les coûts sont constants (i.e.  $t = p$ ), tandis qu'il devient équivalent à un système de permis si ces coûts sont infinis (i.e.  $s = 0$  et  $t = +\infty$ ). Ainsi, il conserve la flexibilité du marché tout en évitant la montée du prix des permis. Ces propriétés font qu'un tel système permet d'approximer la fonction de dommage marginal (figure 2.7).

## 2.5 Conclusion

Dans un monde idéal où l'information est parfaite, l'application d'une taxe ou la mise en place d'un marché de permis négociable permettent d'atteindre le niveau optimal de pollution (Pigou, 1920; Coase, 1960; Dales, 1968). En fait, le taux de taxe qui correspond au niveau optimal de pollution est égal au prix de marché des permis émis en quantité équivalente au niveau optimal. Les deux instruments assurent la minimisation du coût d'atteinte du niveau optimal.

Toutefois, en cas d'information imparfaite, ces instruments ne sont plus équivalents (Cropper et Oates, 1992). Et une comparaison de leur efficacité respective ne permet pas toujours de trancher quant à la supériorité de l'un sur l'autre. En fait, nous savons désormais, d'après l'analyse de Weitzman (1974), que si les coûts d'abattement sont incertains pour le régulateur, 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. Une pente forte de la courbe de bénéfice marginal signifie que le dommage augmente rapidement avec la quantité de pollution. Dans ce cas, pour éviter un dommage environnemental trop important, il serait moins risqué d'avoir une certitude sur le niveau de pollution : on privilégie ainsi les permis d'émission. Au contraire, si la pente de la courbe du bénéfice marginal est faible, cela signifie que le dommage s'accroît lentement avec la quantité de pollution. Dans ce cas, il est moins coûteux d'avoir une certitude sur le coût marginal d'abattement, plutôt que sur le niveau d'abattement et par conséquent, dans ces conditions, on privilégie la taxe.

L'analyse de Weitzman (1974) a inspiré Roberts et Spence (1976) pour proposer un système hybride combinant les deux instruments. Selon ce système, les firmes choisiront entre acheter des permis sur un marché ou payer une taxe d'émission. Le taux de cette taxe sera anticipé sur la base des *a priori* du régulateur sur la fonction du coût agrégé. Si le prix du permis constaté sur le marché est supérieur au taux de la taxe, certaines firmes choisiront de payer la taxe et le prix du permis chutera jusqu'à ce qu'il soit égale au taux de la taxe. Symétriquement, si le prix du permis est plus bas que le taux de la taxe, alors une demande excessive sur les permis augmentera le prix du permis jusqu'à ce qu'il soit égal au taux de la taxe.

Le système soutenu par R&S présente de multiples avantages en comparaison avec des systèmes de taxe (resp. permis) seulement. D'abord, il conserve les propriétés d'un marché des permis tout en évitant d'exposer les firmes à des prix de permis excessifs lorsque le régulateur sous-estime le niveau d'émission optimal. Ensuite, ce système est un cas général incluant les deux systèmes de taxe et de permis. De ce fait, il leur est nécessairement supérieur puisqu'au lieu d'une variable de décision, le régulateur dispose de trois variables, à savoir : le niveau d'émission autorisé  $l$ , la taxe  $t$  et la subvention  $s$ . Enfin, il permet implicitement d'approximer la fonction de dommage espérée de la pollution à chaque niveau d'émission grâce à la fonction de pénalité imposée aux firmes.

Toutefois, ce système a été conçu en supposant que le marché des permis ne s'ouvre que pour les nouveaux entrants, et se referme une fois que l'allocation initiale est choisie. Ainsi, 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, R&S ne considèrent qu'une fonction de transfert des firmes vers le régulateur linéaire dans la demande et l'offre des permis. Ceci ne leur permet que d'approximer la fonction de dommage, supposée convexe, par une fonction en escalier.

Dans le chapitre suivant, nous généraliserons le système hybride de R&S

en relâchant la contrainte de linéarité de la fonction de pénalité. Celle-ci n'est plus forcément linéaire. Nous démontrons que ce nouveau système hybride « généralisé » permet d'approximer davantage la fonction de dommage, voire de la dupliquer. La fonction de pénalité linéaire par morceaux de R&S n'est qu'un cas particulier de notre système.

# Chapitre 3

## COMBINAISON OPTIMALE PERMIS-TRANSFERT

### 3.1 Introduction

Dans le chapitre 2, nous avons vu que, dans un cadre statique, Roberts et Spence (1976) montrent qu'un instrument combinant taxe et permis permet de limiter les conséquences de l'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, si les coûts sont plus faibles que prévus, le régulateur propose une subvention en échange du surplus d'abattement réalisé par les firmes.

Ce système prévoit une pénalité pour éviter la flambée du prix des permis lorsqu'il s'avère que l'allocation initiale de permis ne suffit pas pour satisfaire la demande des firmes en permis. Il permet également d'éviter la chute du prix des permis à un niveau qui n'assurerait pas l'efficacité environnementale. 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<sup>1</sup>. Cependant, dans ce système le régulateur est le seul vendeur de permis et la vente de l'allocation initiale aux firmes demandeuses de permis est de type « one shot ». Ainsi, si on normalise le prix des permis à zéro, comme c'est le cas d'une distribution gratuite de l'allocation initiale, ce système se réduit à un simple système de transferts monétaires. Par ailleurs, la linéarité de la fonction de transfert ne permet d'approximer la fonction de dommage que par une fonction linéaire par morceaux.

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 leurs dotations dans R&S (1976).

La seconde hypothèse, qui consiste à poser : i) que la fonction de transfert entre le régulateur et la firme est linéaire par morceaux et ii) 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 la fonction de dommages.

Dans ce chapitre, nous généralisons le système combiné permis-taxe proposé par R&S (1976) à des fonctions de transferts non nécessairement linéaires. Précisément, le régulateur n'observe pas les technologies d'abatement 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'abatement auxquels s'ajoute la dépense en dotation initiale et, éventuellement, des transferts avec le régulateur). Dans R&S, les firmes peuvent, une fois les permis achetés, en racheter d'autres au régulateur à un taux de taxe fixe  $t$  ou, au contraire, lui vendre leur excédent à un taux de subvention fixe  $s$ . Les deux taux étant, par hypothèses différents,

---

1. Pour une analyse spécifique de cette question dans un contexte de pollution diffuse, le lecteur peut se référer à Herriges (1994).

R&S 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 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 dont la forme 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 réplique est parfaite lorsque l'estimation des coûts agrégés faite par le régulateur est parfaite. Si son estimation est imparfaite (sous-estimation ou surestimation des coûts d'abattement), la fonction de transfert réplique une fonction de dommage marginal calculée sur la base d'émissions estimées des firmes.

Sous l'hypothèse de concurrence entre les firmes et d'hétérogénéité des technologies, nous montrons également, comme Roberts et Spence (1976), que la décentralisation des décisions des firmes en matière d'émissions conduit à une solution qui correspond à celle que l'on aurait obtenue dans un modèle 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 surestimés par le régulateur.

L'ensemble de notre analyse est mené 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 cette thèse. Notons toutefois que les travaux empiriques de Pizer (2002) 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.

Ce chapitre est organisé comme suit. Dans la section 3.2, nous présentons le modèle généralisé. Nous analysons les caractéristiques des équilibres possibles et nous relâchons l'hypothèse de linéarité de R&S (1976). Nous étudions ainsi la forme que peut prendre la fonction de transfert (imposée par le régulateur aux firmes) 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 section 3.3 est consacrée au programme d'optimisation du régulateur. Par la résolution de ce programme, nous montrons notamment, comme R&S dans un système général, que seules les firmes ayant des coûts d'abattement faibles (par rapport à une fourchette moyenne) ou des coûts d'abattement élevés s'adresseront au régulateur. Ainsi, ce système permet alors au régulateur d'obtenir « gratuitement » de l'information sur les coûts d'une partie des firmes du secteur. Nous discutons des marges de manœuvre du régulateur dans la section 3.4. La dernière section conclut le chapitre et présente les implications empiriques de nos résultats. Nous montrons finalement que le système combiné permis-taxe généralisé (par rapport au modèle de R&S) permet de répliquer au niveau agrégé la fonction de dommage social lorsque les coûts individuels d'abattement ne sont pas connus du régulateur.

## 3.2 Modèle

Considérons une firme  $i$  qui a la possibilité de réduire sa pollution moyennant un coût d'abattement  $C^i(x_i, \theta)$ , avec  $x_i$  son volume d'émission de polluants et  $\theta$  l'incertitude sur la structure de coût d'abattement à laquelle fait face le régulateur. On pose les hypothèses raisonnables suivantes :

### **Hypothèse 3.1**

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

$$C^i(\bar{x}_i, \theta) = 0, \quad C_{x_i}^i < 0, \quad C_{x_i x_i}^i > 0, \quad C_\theta^i > 0$$

La réduction d'émission au niveau  $x_i$  peut être due à des changements dans les quantités d'intrants ou de biens produits. Pour un niveau de technologie donné, 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 d'abattement social (Chapitre 2).

Le régulateur ne connaît pas le coût 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 elle. Aucun agent n'est autorisé 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. À l'inverse, toute économie pourra faire l'objet d'une compensation. Nous retenons ainsi l'hypothèse de R&S (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 3.2

Soit  $t(z_i)$  une fonction continue et presque partout différentiable de transfert financier de la firme vers le régulateur, avec  $z_i = x_i - l_i$  la demande nette d'émission 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 :

$$\underset{l_i, x_i}{\text{Min}} CT^i(x_i, \theta) = C^i(x_i, \theta) + q.l_i + t(z_i) \quad \forall x_i \in [0; \bar{x}_i]; z_i = x_i - l_i \quad (3.1)$$

En suivant R&S dans cette section, nous analysons ci-après les propriétés de l'équilibre.

**Lemme 3.1**

(i) Les conditions de premier ordre du programme (3.1) s'écrivent :

$$\begin{cases} x_i^* & / & \frac{\partial C^i(x_i^*, \theta)}{\partial x_i} + \frac{\partial t(z_i^*)}{\partial z_i} = 0 \\ l_i^* & / & q - \frac{\partial t(z_i^*)}{\partial z_i} = 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

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

Les points (i) et (ii) du lemme 3.1 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 R&S n'est alors qu'un cas particulier de notre modélisation <sup>1</sup>.

Nous analysons dans tout de suite les propriétés de l'équilibre. Considérons <sup>2</sup> tout d'abord le niveau optimal de permis que la firme achète initialement. Notons  $\frac{\partial t(z_i)}{\partial z_i} |_{z_i > 0} \equiv t_{z_i^+}(z_i)$  et  $\frac{\partial t(z_i)}{\partial z_i} |_{z_i < 0} \equiv t_{z_i^-}(z_i)$ .

★ Si  $q < \lim_{z_i \rightarrow -\infty} t_{z_i^-}(z_i)$  :

---

1. Rappelons que dans R&S (1976), le transfert marginal est 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  $x_i = l_i$ . Nous obtenons une condition similaire, mais résultant des conditions de l'optimisation et appliquée à la fonction de transfert non nécessairement linéaire par morceaux.

2. Dans 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  $z_i = 0$  (ce qui est le cas pour la fonction linéaire par morceaux de R&S).

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  $q > \lim_{z_i \rightarrow +\infty} t_{z_i^+}(z_i)$  :

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 3.1, ces premiers résultats nous permettent de dériver les propriétés de la fonction de transfert.

**Lemme 3.2**

À prix unitaire  $q$  donné des permis, la fonction de transfert  $t(\cdot)$  à l'équilibre est telle que

$$\lim_{z_i \rightarrow -\infty} t_{z_i^-}(z_i) \leq q \leq \lim_{z_i \rightarrow +\infty} t_{z_i^+}(z_i)$$

Cherchons maintenant les caractéristiques de l'optimum.

★ Si  $\lim_{z_i \rightarrow 0} t_{z_i^-}(z_i) > q$  :

Dans ce cas, il existe un niveau  $z_i^* < 0$  tel que  $t_{z_i^-}(z_i^*) = q$  : la firme choisit un niveau d'émission  $x_i^*$  inférieur au niveau  $l_i^*$  de permis qu'elle achète initialement sur le marché des permis. D'après (3.2) et pour  $l = l_i^*$ , le montant optimal  $x_i^*$  vérifie :

$$\begin{aligned} \frac{\partial C^i(x_i^*, \theta)}{\partial x_i} &= t_{z_i^-}(z_i^*) \\ &= q \end{aligned} \tag{3.3}$$

★ Si  $\lim_{z_i \rightarrow 0} t_{z_i^-}(z_i) \leq q \leq \lim_{z_i \rightarrow 0} t_{z_i^+}(z_i)$  :

Dans ce cas, la firme choisit les quantités telles que  $l_i^* = x_i^*$  et

$$-\frac{\partial C^i(l_i^*, \theta)}{\partial x_i} = q \quad (3.4)$$

Notons que si la fonction  $t(z)$  est différentiable en zéro, on a alors

$$\begin{aligned} \lim_{z_i \rightarrow 0} t_{z_i^-}(z_i) &= \lim_{z_i \rightarrow 0} t_{z_i^+}(z_i) \\ &= t_{z_i}(0) \end{aligned} \quad (3.5)$$

★ Si  $\lim_{z_i \rightarrow 0} t_{z_i^+}(z_i) < q$  :

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

$$\begin{aligned} -\frac{\partial C^i(x_i^*, \theta)}{\partial x_i} &= t_{z_i^+}(z_i^*) \\ &= q \end{aligned} \quad (3.6)$$

Nos résultats sont résumés dans la proposition qui suit et illustrés par la figure 3.1.

**Proposition 3.1**

*Lorsque le régulateur ne connaît pas parfaitement la structure des différentes fonctions de coût d'abattement, le mécanisme décentralisé mixte marché-régulateur permet une distribution efficace des abattements au sein de la population des firmes :*

$$-\frac{\partial C^i(x_i^*, \theta)}{\partial x_i} = -\frac{\partial C^j(x_j^*, \theta_j)}{\partial x_j} \quad \forall i, \forall j \quad (3.7)$$

Cette proposition est une généralisation du résultat de R&S (1976) au cas non linéaire de la fonction de transfert. L'égalité (3.7) découle directement de l'égalité (3.6).

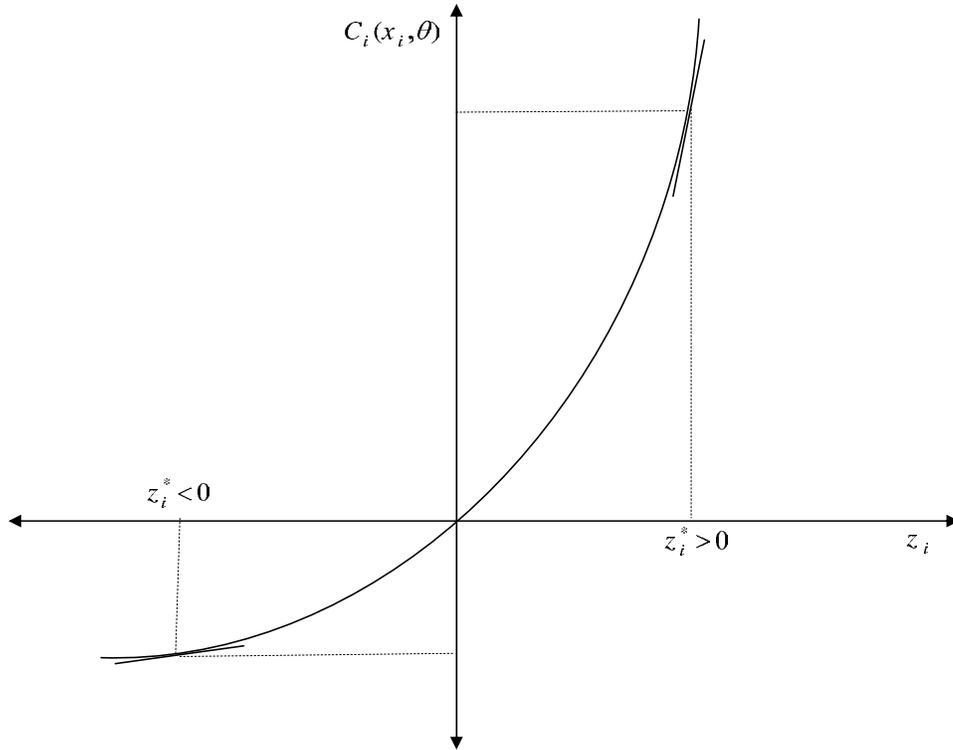


FIGURE 3.1 – Optima en fonction du permis :  
 i) la fonction de transfert est non linéaire,  
 ii)  $t_{z_i^+} = 0$  si  $z_i = 0$ ,  
 iii)  $t_{z_i^+} > 0$  si  $z_i > 0$ ,  
 iv)  $t_{z_i^+} < 0$  si  $z_i < 0$  avec  $|t_{z_i^+}| > |t_{z_i^-}|$ .

Une conséquence directe de la proposition 3.1 est que le régulateur n'a besoin d'estimer que les coûts totaux de dépollution,  $C(x, \theta) = \sum C^i(x_i^*, \theta)$  avec  $x = \sum x_i^*$ , et donc de décider  $l^*$ . Les firmes minimisent ensuite leur coût individuel respectif en choisissant  $l_i^*$  et  $x_i^*$ . Toutefois, comme le coût total dépend des types  $\theta$  des firmes, le régulateur ne peut en obtenir qu'une estimation plus ou moins précise. Il doit ainsi décider d'un niveau agrégé  $l^*$  de permis à mettre sur le marché sur la base de cette estimation et peut se tromper. On obtient finalement la proposition suivante :

**Proposition 3.2**

Le couple  $(x, q)$ , à l'équilibre, vérifie :

(i)  $-\frac{\partial C(x, \theta)}{\partial x} = q$

(ii)

$$\left\{ \begin{array}{ll} x = l \text{ et } \lim_{z \rightarrow 0} t_{z-}(z) \leq q \leq \lim_{z \rightarrow 0} t_{z+}(z) & \text{si } \lim_{z \rightarrow 0} t_{z-}(z) \leq -\frac{\partial C(l, \theta)}{\partial x} \leq \lim_{z \rightarrow 0} t_{z+}(z) \\ x > l \text{ et } q = t_{z+}(z) & \text{si } -\frac{\partial C(l, \theta)}{\partial x} \geq t_{z+}(z) \\ x < l \text{ et } q = t_{z-}(z) & \text{si } -\frac{\partial C(l, \theta)}{\partial x} \leq t_{z-}(z) \end{array} \right.$$

La condition (i) est une conséquence directe de la proposition 3.1. 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 agrégé de dépollution évalué en  $l^*$  étant plus élevé que son estimation faite par le régulateur, les émissions  $x^*$  seront supérieures aux permis  $l^*$  mis sur le marché.

À l'inverse, une surestimation 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, comme dans Roberts et Spence (1976), de reproduire une solution décentralisée (chaque firme choisit ses valeurs  $x_i^*$  et  $l_i^*$ ) en solution centralisée : une firme représentative (ou résultante de la fusion de toutes les firmes) choisit les paramètres qui mènent à l'équilibre  $x^* = \sum x_i^*$  et  $l_i^* = \sum l_i^*$ . 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 intéresserons 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 les demandes nettes de permis lorsque l'estimation des coûts agrégés n'est pas parfaite.

### 3.3 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 introduire initialement sur le marché. Son objectif est la minimisation des coûts totaux espérés de l'émission de polluants sachant qu'il ne connaît pas les coûts de dépollution des firmes mais n'en a qu'une estimation.

Il peut, néanmoins, prendre en considération le fait que les firmes à bas coûts de dépollution seront offreuses nettes d'émission tandis que celles ayant les coûts de dépollution les plus élevés seront demandeuses 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, comme R&S (1976), que les types  $\theta$  sont distribués 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  $\theta_i$ . Définissons  $\theta_1$  et  $\theta_2$  les niveaux qui satisfont :

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

Notons que si la fonction de transfert est différentiable en  $z = 0$ , on aura  $\theta_1 = \theta_2$ . On a alors  $x^* < l$  pour tout  $\theta < \theta_2$  et  $x^* > l$  pour tout coût de type  $\theta > \theta_2$ . En notant encore  $x_1(\theta, t_{z^-}(z_1)), x_2(\theta, t_{z^+}(z_2)), z_1 = x_1 - l$  et  $z_2 = x_2 - l$  les fonctions qui satisfont :

$$-\frac{\partial C(x_1(\theta, t_{z^-}(z_1)), \theta)}{\partial x} = t_{z^-}(z_1) \quad (3.8)$$

$$-\frac{\partial C(x_2(\theta, t_{z^+}(z_2)), \theta)}{\partial x} = t_{z^+}(z_2) \quad (3.9)$$

Les coûts totaux espérés s'écrivent :

$$\mathbb{C}(t_{z^+}, t_{z^-}, l) = \int_0^{\theta_1} [D(x_1(\theta, t_{z^-}(z_1))) + C(x_1(\theta, t_{z^-}(z_1)), \theta)] f(\theta) d\theta \quad (3.10)$$

$$+ \int_{\theta_1}^{\theta_2} [D(l) + C(l, \theta)] f(\theta) d\theta \quad (3.11)$$

$$+ \int_{\theta_2}^{\bar{\theta}} [D(x_2(\theta, t_{z^+}(z_2))) + C(x_2(\theta, t_{z^+}(z_2)), \theta)] f(\theta) d\theta \quad (3.12)$$

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 :

$$x_1^* / E(D'(x_1^*) + \frac{\partial C(x_1^*, \theta)}{\partial x} | \theta \leq \theta_1) = E(D'(x_1^*) - t_{z^-}(z_1^*) | \theta \leq \theta_1) = 0 \quad (3.13)$$

$$l^* / E(D'(l^*) + \frac{\partial C(l^*, \theta)}{\partial x} | \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2) = 0 \quad (3.14)$$

$$x_2^* / E(D'(x_2^*) + \frac{\partial C(x_2^*, \theta)}{\partial x} | \theta \geq \theta_2) = E(D'(x_2^*) - t_{z^+}(z_2^*) | \theta \geq \theta_2) = 0 \quad (3.15)$$

Si l'information sur le coût total  $C(x, \theta)$  était parfaite, le régulateur pourrait alors décider du niveau agrégé optimal d'émission  $x^{**}$  qui vérifierait :

$$D_x(x^{**}) + C_x(x^{**}, \theta) = 0 \quad \forall \theta \quad (3.16)$$

On aurait alors une fonction optimale  $x^{**}(\theta)$  qui minimise les coûts sociaux espérés de la pollution. Il s'agit de l'optimum de premier rang.

Lorsque l'information est imparfaite, ce sont les conditions de premier ordre (3.13) ou (3.15) qui prévalent. La fonction de dommage marginal  $D'(x)$

étant connue du régulateur et indépendante de  $\theta$  (seul son argument en dépend), le régulateur peut alors dupliquer la fonction de dommage marginal avec la fonction de transfert qui ne dépend pas non plus de  $\theta$ . Si  $\theta$  est une bonne estimation des coûts totaux, alors la duplication sera parfaite par rapport à la véritable fonction de dommage. Si l'estimation n'est pas parfaite, la fonction de transfert dupliquera la fonction de dommage estimée  $D(x(\theta))$  et les agents ajusteront leur dotation en permis en s'adressant au régulateur. On aura alors  $x > l$  ou  $x < l$  selon que les coûts auront été sous-estimés ou surestimés.

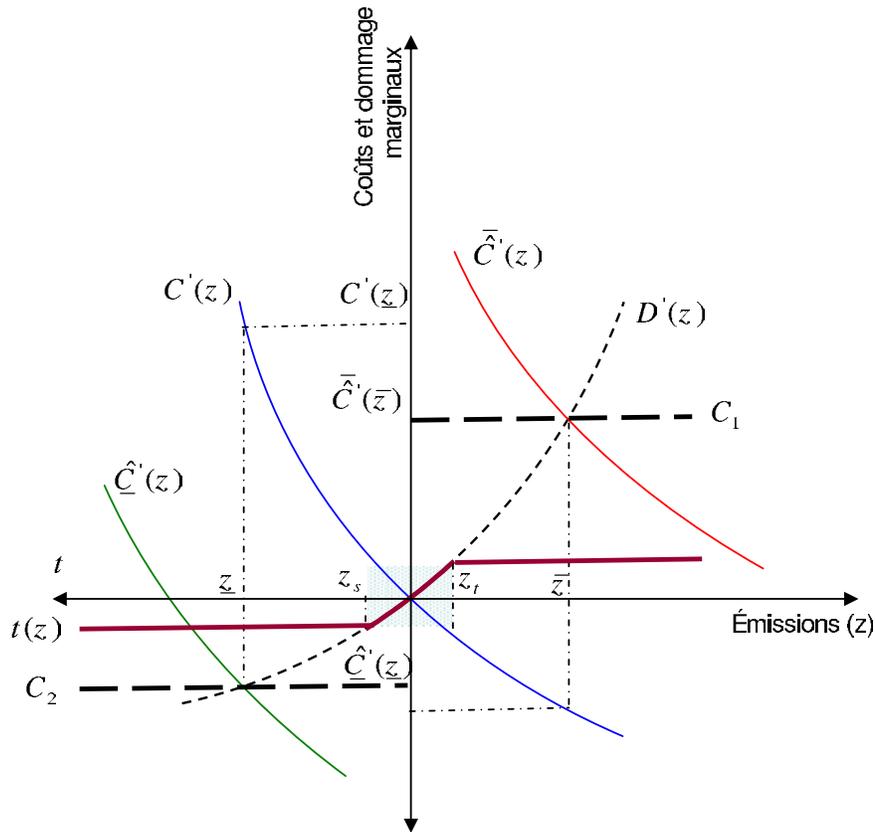


FIGURE 3.2 – Duplication du dommage marginal par la fonction de transfert  $t(z)$

Finalement, en considérant la non-linéarité de la fonction de transfert, nous sommes en mesure de dupliquer la fonction de dommage marginal pour tout  $\theta$  estimé et de nous approcher de l'optimum de premier rang, voire de l'atteindre si l'estimation est parfaite. Ces résultats sont obtenus en tra-

vaillant sur une estimation de la fonction de coûts agrégés et non pas sur les fonctions individuelles.

À l'aide de la figure 3.2, nous décrivons la réaction de la firme à l'imposition d'une taxe, à l'échange des permis et à l'instrument hybride. Comme le régulateur ne connaît pas avec certitude le coût de dépollution de la firme, il peut sous estimer ou surestimer le coût de la dépollution de la firme. Ainsi, il impose, selon le cas, les niveaux d'émission  $\bar{z}$  ou  $\underline{z}$  aux prix d'émission (taxe ou prix de permis) respectivement équivalents aux  $\bar{C}'(\bar{z})$  et  $\underline{C}'(\underline{z})$ . Ces niveaux d'émission sont soit plus élevés, soit plus faibles que le niveau d'émission optimal de la firme  $z^* = 0$ .

La combinaison de la taxe et du permis permet d'éviter la chute ou l'envolée du prix d'émission dans le cas d'une mauvaise connaissance des coûts des firmes. Ainsi, si le coût de dépollution estimé par le régulateur est plus élevé que le prix optimal, la quantité de permis émise est plus élevée que la quantité efficace, ce qui entraîne une chute du prix de permis. Toutefois, en prévoyant un transfert monétaire  $t(z)$  vers la firme, le régulateur assure que le prix du permis ne peut tomber au-dessous de ce transfert puisque la firme aura toujours intérêt à vendre au régulateur ses permis non utilisés. Au contraire, si le régulateur sous estime le coût de dépollution de la firme, il fixera un niveau de dépollution sévère qui provoquera une hausse de prix des permis. Mais, grâce à la fonction du transfert, la firme peut émettre une quantité plus élevée moyennant un transfert payé au régulateur sur ses émissions supplémentaires. Dans ce cas, le régulateur évite que le prix du permis soit plus élevé que le transfert car il est rationnel de payer des permis au prix  $t(z)$  plutôt que de les acheter sur le marché. Finalement, le système hybride permet de limiter les émissions à un niveau plus proche du niveau optimal. Autrement dit, la fonction  $t(z)$  permet de mieux approximer la fonction du dommage qu'une taxe ou permis seuls (la courbe  $C_2$  au lieu des courbes  $C_1$  et  $C_3$ ).

### 3.4 Marges de manœuvre du régulateur

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 de pollution émise respecte l'objectif du régulateur ( $\sum l_i = \sum x_i$ ). Son intervention est donc inutile. Les firmes 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 coûts marginaux d'abattement les plus bas. Dans ce cas, le régulateur se contente 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. Dans ce cas, 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 surestimés, 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 faible bénéfice marginal 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 di-

oxyde de carbone en 2007 : il a baissé de 80% en deux ans<sup>1</sup>. Cette chute est due à une surallocation de crédits de dioxyde de carbone de la part des gouvernements européens à leurs firmes (l'allocation initiale devait se faire selon la procédure du *grandfathering*, 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.

Notons que pour dévier de sa stratégie initiale, le régulateur peut recourir au système hybride qui peut jouer le même rôle que les opérations d'« *open market* ». Ces dernières constituent le plus important instrument de la politique monétaire qu'utilisent les banques centrales pour régler la masse monétaire qui circule dans l'économie. Ainsi, grâce à l'instrument hybride, le régulateur peut contrôler le prix des permis d'émission lorsqu'il s'avère que les prix sont jugés trop élevés ou trop faibles. En fait, le régulateur autorise l'émission des quantités supplémentaires de polluant moyennant des transferts payés par les firmes. Il peut également racheter les permis qui ne sont utilisés par les firmes en contrepartie des transferts.

### 3.5 Conclusion

Depuis 1974, nous savons d'après Weitzman qu'en situation d'incertitude la préférence pour un instrument de quantité ou de prix est particulièrement déterminée par la pente relative de la courbe du dommage marginal et du coût marginal. Dans le cas des émissions des GES, La courbe de dommage marginal est moins pentue que celle de coût marginal de dépollution (Gastaldo, 2009). Cela aurait encouragé l'application de la taxe pour réguler les émissions selon la théorie. Or, pour des raisons politiques, les pays ont tendance à préférer les permis d'émission. Dans un tel contexte, il peut alors

---

1. *Les échos* 28-29 avril 2006.

être souhaitable d'envisager un contrôle des émissions polluantes basé sur un système combiné taxe et permis, tel que proposé initialement par R&S (1976). Dans leur modèle, les firmes peuvent, une fois les permis achetés, en racheter d'autres au régulateur à un taux de taxe fixe  $p$  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 ce chapitre, nous avons dépassé le cadre d'analyse de R&S 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 par le régulateur de l'information sur les fonctions de coûts grâce à une auto-différenciation des firmes : seules celles qui possèdent un coût d'abattement faible ou 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 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.

Dans le chapitre suivant, nous allons nous intéresser à un autre problème dont fait face le régulateur lorsqu'il se prêle à réguler les émissions des firmes de coûts de dépollution différents à l'aide d'un prix d'émission unique.

## Chapitre 4

# ANTISÉLECTION, PERMIS D'ÉMISSION ET DIFFÉRENCIATION OPTIMALE DES PRIX

### 4.1 Introduction

En pratique, la taxe a été utilisée dans différents pays pour réglementer l'utilisation d'engrais azotés par les agriculteurs, notamment en Suède. La France a décidé aussi de taxer tous les consommateurs d'énergies fossiles, ménages et entreprises à l'exception de celles soumises au système européen de quotas de dioxyde de carbone et celles jugées plus exposées à cette taxe. Un large débat a eu lieu sur le « bon » niveau du taux de taxation. Alors que les experts ont annoncé que le prix minimum devrait être de 30 € par tonne, le gouvernement a finalement décidé de le fixer à 14 € par tonne, essentiellement pour l'acceptabilité sociale et pour des caractéristiques de solvabilité. Ces arguments sont ceux des citoyens, en particulier en période de récession ou de stagnation économique. Le gouvernement a prévu également la redistribution du revenu de la taxe sur les consommateurs qui ne sont pas en mesure d'adopter des technologies moins polluantes. Nous pouvons citer pour exemple les zones rurales sans réseaux de transport collectif ou les mé-

nages à faible revenu, qui ne sont pas capables de modifier leur technique de chauffage à court terme<sup>1</sup>.

La mise en place de cette taxe à taux unique, c'est-à-dire qui n'est pas différencié en fonction des coûts de dépollution des assujettis, peut créer, pour les firmes ou les ménages aux coûts de dépollution élevés, des difficultés, à atteindre le niveau d'émission approprié. En même temps, d'autres firmes, aux coûts de dépollution faibles, pourraient réduire davantage la pollution. Mais elles ne sont pas incitées à le faire si le coût de la dépollution n'est pas trop élevé. Une solution consiste à différencier les prix unitaires afin de réguler la pollution à un coût minimum. Ces prix doivent s'approcher des coûts de dépollution des firmes.

Dans la politique française, les décideurs essaient de mettre en application un tel type de différenciation entre la population des consommateurs. Le processus de redistribution vise à différencier entre les différents types de consommateurs. Malheureusement, cela exigera aussi de larges quantités d'informations sur leurs coûts efficaces, leur incapacité effective à changer leurs comportements, etc. Ceci peut mener à des coûts plus importants que les bénéfices escomptés. Enfin, parce que l'hétérogénéité existe entre les technologies de réduction des agents économiques, ils choisiront également différents niveaux d'émission ou de consommation de biens polluants. Ainsi, afin de collecter la taxe, le régulateur doit également disposer d'informations fiables sur ces différentes consommations et émissions.

D'un point de vue théorique, la situation que nous venons de décrire ci-dessus traite d'un problème d'antisélection. Nous savons, depuis Akerlof (1970) et les nombreux articles mettant l'accent sur cette question, que la solution consiste à définir certains contrats séparateurs, afin que chaque type

---

1. Tout en acceptant le principe de cette taxe, le conseil constitutionnel l'a rejeté car elle fait l'objet de trop d'exemptions qui violeraient le principe d'égalité devant l'impôt (pêcheurs, agriculteurs, routiers, marché des quotas européens, ...) et seraient contraires à l'objectif de lutte contre le réchauffement climatique. Finalement, le gouvernement a abandonné cette taxe en évoquant un risque de perte de compétitivité des entreprises françaises.

se révèle en choisissant le contrat qui lui a été destiné. C'est pourquoi le régulateur n'a plus besoin de savoir qui est qui et il peut économiser une partie des coûts de l'information.

Dans le cadre de la concurrence imparfaite et la tarification du monopole, quelques résultats importants ont été obtenus dans un cadre où l'Agent ( une firme monopolistique) a un avantage informationnel sur le Principal ( le régulateur) (Loeb et Magat, 1979; Baron et Myerson, 1982; Laffont et Tirole, 1990). Particulièrement, Baron et Myerson (1982) proposent de donner une prime aux firmes qui acceptent de révéler *ex ante* leur plan de production ainsi que dans le cas où ces plans sont efficacement réalisés *ex post*.

En économie de l'assurance, l'antisélection est aussi le sujet de nombreux papiers. Particulièrement, on sait que les risques élevés doivent obtenir un contrat d'assurance complet avec un prix déterminé en fonction de la probabilité de perte élevée. Les risques faibles ont accès à une assurance partielle, mais tarifée à un taux faible (Rothschild et Stiglitz, 1976; Wilson, 1977; Stewart, 1994). Dans un tel cadre, les contrats sont différenciés en fonction des prix et des quantités.

Malheureusement, et même si le sujet de l'hétérogénéité de coût d'abattement est reconnu comme étant une question importante, il n'y a pas tant d'articles qui la traitent et les résultats sont parfois plutôt différents d'un article à l'autre<sup>1</sup>.

Dans ce chapitre, nous considérons un régulateur voulant que les firmes internalisent les externalités négatives générées par leurs émissions polluantes. La politique environnementale qui est mise en œuvre est proche d'un marché de permis d'émission, mais il y a seulement un vendeur de permis, à savoir le

---

1. Nous pouvons citer Mougeot et Schwartz (2008), qui montrent que la firme émet moins de pollution en information incomplète qu'en information complète. De plus une rente est donnée aux firmes de coûts élevés pour les inciter à ne pas imiter les firmes de coûts faibles. Bulckaen (1997), pour sa part, montre plutôt que l'incitation à tricher n'est pas « illimitée ». Au delà d'un certain niveau d'émission, les incitations à tricher deviennent plus faibles que l'augmentation du coût de dépollution, et donc dans ce cas le problème de l'antisélection adverse n'est pas fondamental.

régulateur, et seulement une date à laquelle les permis sont vendus. Au début de la période, le régulateur offre quelques contrats aux firmes qui stipulent les quantités de permis et les prix de vente. Selon leur structure de coût d'abattement, elles choisissent un contrat dans le menu. Une telle politique environnementale laisse une certaine marge pour des stratégies de dépollution différentes. En effet, la firme choisit entre s'abstenir d'émettre une unité de pollution et supporter un coût de dépollution interne, ou émettre celle-ci, mais acheter alors l'équivalent en permis. Le régulateur agit comme un monopoleur, mais il fait face à une certaine concurrence puisque les firmes peuvent décider de ne pas émettre certaines unités de pollution plutôt que d'acheter des permis au régulateur. De là, les prix optimaux dépendront de l'élasticité de la demande de chaque type de firme.

Plus précisément, deux types de firmes sont répartis dans la population, avec des coûts de dépollution élevés et faibles. Premièrement, nous caractérisons le menu optimal des contrats dans un cadre d'information complète et nous montrons que, contrairement à un contrat mélangeant, la discrimination par les prix est déjà appliquée parce que le régulateur est à la recherche de tout le surplus de chaque firme. Ainsi, non seulement les quantités de permis sont différentes d'un type de firme à l'autre mais les prix le sont également. Dans un deuxième temps, nous nous concentrons sur l'antisélection et nous montrons que, premièrement, les quantités optimales d'émission restent les mêmes que dans l'optimum de premier rang, contrairement à ce qui est obtenu par Mougeot et Schwartz (2008) et Shah (2005). En second lieu, toutes les incitations à révéler le vrai type sont véhiculées par les prix. Dans notre contexte, ce sont les firmes à coût de dépollution élevé qui paient un prix plus élevé que dans le cadre d'information complète. La situation des firmes à coût de dépollution faible reste inchangée. Ce résultat peut être interprété comme l'existence d'une rente négative supportée par les types de coût élevé. En outre, dans les deux cadres (avec et sans information complète sur les types), les prix peuvent être négatifs pour les faibles élasticités de la demande. Ainsi, des subventions sont envisagées pour inciter les firmes à réduire leur niveau de pollution. Nous discutons différentes situations possibles : i) des prix positifs pour les deux types ii) des prix négatifs pour les deux types et iii) un

prix positif pour le type à coût de dépollution faible et un prix négatif pour le type à coût de dépollution élevé.

D'un point de vue méthodologique, deux différences principales apparaissent lorsque l'on compare avec la formalisation de Rothschild et Stiglitz ; Premièrement, nous avons affaire à des informations incomplètes sur la structure des coûts de dépollution et non pas sur les risques. Deuxièmement, dans notre modèle, nous ne prévoyons pas de contraintes de participation pour les firmes. Celles-ci sont contraintes d'être des actrices de la politique environnementale mise en œuvre par le régulateur. Néanmoins, cette politique est appliquée à son coût minimum. Ce dispositif peut expliquer pourquoi la rente d'information que nous obtenons diffère d'un cas standard.

Ce chapitre s'organise comme suit : avant la présentation du modèle formel, nous décrivons dans la section 4.2 les principaux aspects théoriques de la problématique et les résultats. Puis, la section 4.3 porte sur l'optimum de premier rang, prévu dans un cadre d'information complète. Ensuite, la section 4.4 traite de l'antisélection. La section 4.5 conclut le chapitre.

## 4.2 Principaux aperçus

Comme mentionné dans l'introduction, le problème de l'antisélection sur lequel nous nous concentrons dans le présent chapitre n'est pas standard, même si le début de l'histoire semble être classique. Nous considérons une économie dans laquelle deux types de firmes produisent certains biens et émettent certains polluants. Sans aucune politique environnementale, aucune des firmes n'internalise les externalités négatives que génèrent ses activités et elles émettent le niveau maximum d'émissions (par rapport à leur plan de production). Nous retenons l'hypothèse que les marchés sont concurrentiels (*cf* chapitre 2) qui nous permet de travailler surtout sur la minimisation des coûts de dépollution (Roberts et Spence, 1976).

Un régulateur, en charge de la maximisation du bien-être social, décide d'obliger les firmes à acheter une quantité de permis en contrepartie de leurs

émissions individuelles. Cette vente a lieu entre chaque firme et le régulateur, de sorte qu'il n'y a qu'un seul vendeur sur ce marché. Il est responsable de la liquidité du marché et il décide des prix.

La chronologie des actions est la suivante. Avant tout, le régulateur doit déterminer le niveau de pollution totale qui minimise le coût social, ce qui implique non seulement les dommages sociaux dus à la pollution mais aussi les coûts de dépollution de toutes les firmes. Une fois que ce montant total est déterminé, il doit décider comment distribuer cette allocation initiale entre les firmes sachant qu'elles présentent certains coûts d'abattement hétérogènes et, comme conséquence directe, des disponibilités différentes à payer. C'est pourquoi le prix doit être déterminé de façon à minimiser le coût total de dépollution des émissions. Mais cela n'est peut-être pas suffisant. En effet, si le régulateur est en mesure d'observer parfaitement le type de chaque firme, il peut associer à chaque type de firme un contrat adéquat, qui stipule les quantités et les prix. Si l'asymétrie d'information l'emporte sur le type de firme, les prix devraient aussi être déterminés en vue de donner des incitations aux agents à révéler leur vrai type. Ainsi, l'objectif ne peut se limiter à minimiser les coûts. Le menu des contrats proposé doit être également incitatif.

Dans ce chapitre, notre approche diffère de celle d'un modèle classique. D'une part, nous supposons que le régulateur fixe les prix dans le cadre d'information complète, ce qui permet au régulateur de capturer tout le surplus des firmes. D'autre part, dans le contexte environnemental qui nous occupe, il est évident que les firmes auront plus de coûts à supporter quand une politique de réglementation est mise en œuvre que dans un contexte sans aucune contrainte. Ainsi, il est totalement illusoire d'essayer de construire des contrats qui ont un caractère incitatif tout en garantissant la participation des firmes. De ce fait, l'antisélection que nous abordons est un programme avec des contraintes d'incitation, mais sans contraintes de participation. En outre, et dans le même esprit, la fonction objectif du régulateur n'est pas en conflit avec celles des firmes. En effet, elle englobe leur objectif de la minimisation du coût d'abattement, mais aussi le coût de la pollution pour les victimes. Une conséquence importante de ce cadre est qu'aucune rente

n'est accordée au « bon » type dans notre modèle, contrairement à ce qui est généralement observé dans les modèles standards « à la Rothschild et Stiglitz ». La rente est accordée à la firme du « mauvais » type, à savoir celle de coût de dépollution élevé, tandis que les firmes à coût de dépollution faible obtiennent le même prix que dans un modèle d'information complète. Elles n'ont aucun intérêt à mentir et à annoncer qu'elles sont du « mauvais » type, puisque le prix payé par celles-ci est toujours plus élevé que le prix qu'elles paieront comme étant de type « bon ».

Finalement, toute distorsion due à une information incomplète est véhiculée par le prix. L'attribution des permis en fonction des émissions passées (*grandfathering*) n'est plus optimale avec l'antisélection car on offre des prix identiques, égales en fait à zéro, aux différents types de firmes. Les quantités restent les mêmes avec ou sans information incomplète.

### 4.3 Optimum de premier rang

Considérons une population distribuée en deux types  $h$  et  $b$  utilisant deux technologies différentes : une proportion  $\pi$  (respectivement  $1 - \pi$ ) de firmes de type  $h$  (respectivement  $b$ ) possédant une technologie de coût de dépollution élevé (respectivement faible).

Le régulateur distribue une quantité  $l$  de permis aux firmes pour que celles-ci internalisent les effets négatifs de leur processus de production. Le coût d'abattement de la firme  $i$ ,  $i = h, b$ , est noté  $C_i(l_i)$ , avec  $l_i \in [0, \bar{l}]$  étant son niveau individuel d'émission. La firme  $i$  doit acheter un permis pour chaque unité d'émission :  $l_i$  est aussi la quantité de permis qu'elle achète.

La structure de coût  $i$  est une connaissance commune. Néanmoins, dans la troisième section du présent chapitre le régulateur n'aura aucune information sur laquelle des firmes est de type  $h$  (respectivement  $b$ ).

Sans aucune réglementation environnementale, il est toujours supposé que toutes les firmes adoptent le même niveau d'émission, à savoir  $l_i = \bar{l}$  et que ce niveau induit un coût d'abattement égal à zéro :  $C_i(\bar{l}) = 0$ . De plus, nous énonçons les hypothèses raisonnables suivantes :

**Hypothèse 4.1**

$$C_i(l_i) \geq 0, C_i(\bar{l}) = 0, C'_i(\cdot) < 0, C''_i(\cdot) > 0 \quad i = h, b$$

Par ailleurs, les firmes de type  $h$  ont toujours un coût marginal d'abattement plus élevé que les firmes de type  $b$ .

**Hypothèse 4.2**

Nous supposons que  $C'_h(l) < C'_b(l) \forall l \in [0, \bar{l}[$ .

Une conséquence directe des hypothèses 4.1 et 4.2 est que les firmes de type  $h$  ont toujours un coût total d'abattement plus élevé pour un niveau donné d'émission que les firmes de type  $b$ .

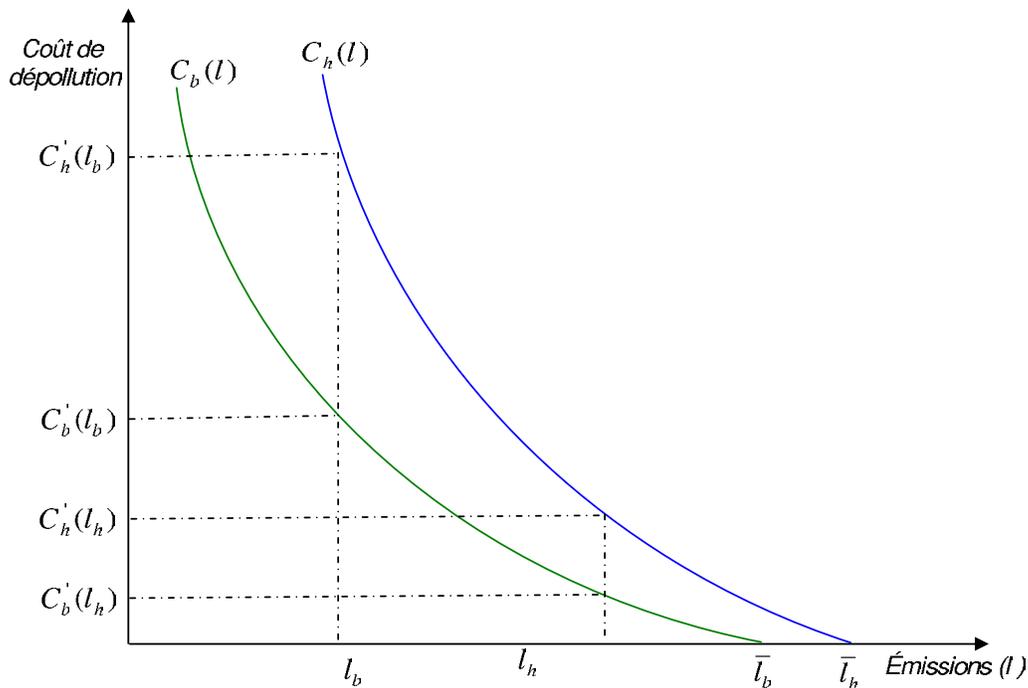


FIGURE 4.1 – Coût marginal de dépollution avec  $l_h > l_b$

La figure 4.1 montre les deux fonctions de coût marginal de dépollution. Notons que le coût marginal est négatif dans notre cadre : c'est le coût de dépollution d'une unité supplémentaire de pollution en fonction des émissions.

Nous rappelons que c'est d'autant plus difficile de dépolluer que le niveau d'émission est faible (*cf* chapitre 2). Autrement dit le coût de dépollution d'une unité additionnelle décroît avec le niveau d'émission.

Finalement, la quantité totale de polluants émise par toutes les firmes est :

$$l = \pi l_h + (1 - \pi) l_b.$$

Elle provoque pour la société un dommage environnemental représenté par une fonction  $D$  de  $l$  croissante et convexe :

$$D \equiv D(l), \quad D'(\cdot) > 0, \quad D''(\cdot) > 0$$

Cette fonction de dommage social est une connaissance commune. Le coût social total de pollution s'écrit :

$$C^s(l, l_h, l_b) = \pi C_h(l_h) + (1 - \pi) C_b(l_b) + D(l) \quad (4.1)$$

La chronologie des décisions est comme suit : D'abord, le régulateur fixe le niveau total de permis  $l$  qu'il alloue aux firmes, sachant que les quantités  $l_h$  et  $l_b$  qui sont vendues aux différents types dépendront de  $l$ . Puis, il détermine l'allocation optimale entre les deux types de firmes et les prix optimaux. Les quantités  $l_i$ ,  $i = h, b$ , minimisent le coût privé de chaque type de firme, tandis que les prix minimisent les coûts d'abattement totaux. Enfin, le régulateur est capable de proposer un menu de contrats aux différents types de firmes.

### 4.3.1 Niveau optimal agrégé de permis

Le régulateur doit déterminer le niveau de permis  $l^*$  qui minimise le bien-être social. Formellement, tenant compte des fonctions de demande  $l_h^* = l_h^*(l)$  et  $l_b^* = l_b^*(l)$ , le programme s'écrit :

$$\begin{aligned} \underset{l}{\text{Min}} \quad C^s(l, l_h^*(l), l_b^*(l)) &= \pi C_h(l_h^*(l)) + (1 - \pi) C_b(l_b^*(l)) + D(l) \quad (4.2) \\ \text{s.c.} \quad l &= \pi l_h^*(l) + (1 - \pi) l_b^*(l) \end{aligned}$$

La condition de premier ordre est telle que :

$$\frac{\partial C^s(l)}{\partial l} = 0 \Leftrightarrow 0 = \pi \cdot l_h^{*'}(l) \cdot C'_h(l_h^*) + (1 - \pi) \cdot l_b^{*'}(l) \cdot C'_b(l_b^*) + D'(l)$$

De (4.3) nous avons  $\pi l_h^{*'}(l) + (1 - \pi) l_b^{*'}(l) = 1$ , de façon que  $l_h^{*'}(l) = \frac{1 - (1 - \pi) \cdot l_b^{*'}(l)}{\pi}$ .

Ainsi :

$$D'(l^*) = (1 - \pi) l_b^{*'}(l) \left( C'_h(l_h^*) - C'_b(l_b^*(l)) \right) - C'_h(l_h^*(l)) \quad (4.3)$$

Il est intéressant de noter que ce résultat reste valable même si le régulateur n'est pas en mesure d'associer un type à chaque firme, notamment lorsqu'il est confronté à un problème d'antisélection. En effet, cette condition exige seulement qu'il connaisse parfaitement la structure de coût de dépollution de chaque type, mais pas nécessairement qu'il sache qui est qui. Une implication importante d'un tel résultat est que le niveau optimal de permis total  $l^*$  qui doit être alloué à l'économie ne sera pas différent de celui de la section 4.4. Les coûts d'agence et les incitations à la révélation du type seront pris en compte par les prix.

### 4.3.2 Allocation optimale des permis

Maintenant, le régulateur doit décider de la façon de répartir la dotation initiale totale  $l$  entre les deux types. La répartition optimale doit minimiser les coûts privés de chaque type de firme. Ainsi, le régulateur doit prendre en considération le programme de minimisation suivant pour le type  $i = b, h$  :

$$\begin{aligned} \underset{l_i}{Min} \quad & C_i(l_i) + p_i \cdot l_i \\ \text{s.c.} \quad & l = \pi l_h + (1 - \pi) l_b \end{aligned} \quad (4.4)$$

Le lagrangien  $\mathcal{L}_i$  s'écrit :

$$\mathcal{L}_i = C_i(l_i) + p_i \cdot l_i + \lambda \left( \pi l_h + (1 - \pi) l_b - l \right)$$

La condition de premier ordre de la firme  $h$  est :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}_h}{\partial l_h} &= C'_h(l_h) + p_h + \lambda\pi = 0 \\ \Leftrightarrow \lambda &= -\frac{(C'_h(l_h) + p_h)}{\pi} \end{aligned} \quad (4.5)$$

La condition de premier ordre de la firme  $b$  est :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}_b}{\partial l_b} &= C'_b(l_b) + p_b + (1 - \pi)\lambda = 0 \\ \Leftrightarrow \lambda &= -\frac{(C'_b(l_b) + p_b)}{(1 - \pi)} \end{aligned} \quad (4.6)$$

De (4.5) et (4.6) nous obtenons :

$$C'_b(l_b) = \frac{(1 - \pi)}{\pi} (C'_h(l_h) + p_h) - p_b \quad (4.7)$$

**Proposition 4.1**

Pour des prix donnés  $p_h$  et  $p_b$  et pour une allocation initiale des permis donnée  $l^*$ , les distributions optimales  $l_h^*$  et  $l_b^*$  entre les firmes sont les fonctions de demande  $l_h(p_h, p_b, l^*)$  et  $l_b(p_h, p_b, l^*)$  qui satisfont :

$$\left\{ \begin{array}{l} l^* = \pi l_h^* + (1 - \pi) l_b^* \\ C'_b(l_b^*) = -\frac{(1 - \pi)}{\pi} (C'_h(l_h^*) + p_h) - p_b \end{array} \right.$$

**4.3.3 Détermination des prix à l'optimum de premier rang**

Notons, pour cette sous-section 4.3.3,  $p_b^{FB}$  et  $p_h^{FB}$  les prix des permis des firmes à l'optimum du premier rang ( $FB$  pour *First-Best*).

L'objectif du régulateur est de mettre en œuvre la politique réglementaire à un coût minimum pour la société. Ainsi, la distribution étant une conséquence du niveau initial optimal de l'allocation  $l$ , il doit maintenant

déterminer les prix auxquels les permis doivent être vendus. Dans un cadre d'information complète, les prix ne sont pas utilisés pour donner des incitations aux firmes puisque le régulateur est capable d'observer le type de chaque firme et, alors, de lui proposer les contrats adéquats  $(l_i, p_i^{FB})$ . Les prix optimaux sont ceux qui minimisent simplement le coût total de la politique réglementaire. Formellement, le régulateur doit résoudre le programme suivant :

$$\underset{p_h, p_b}{\text{Min}} \pi \left( C_h(l_h^*) + p_h \cdot l_h^* \right) + (1 - \pi) \left( C_b(l_b^*) + p_b \cdot l_b^* \right) \quad (4.8)$$

**Proposition 4.2**

*En information complète, les prix de premier rang satisfont :*

$$\begin{cases} p_h^{FB} = -C'_h(l_h^*) / (1 - 1/|\epsilon_h|) & (i) \\ p_b^{FB} = -C'_b(l_b^*) / (1 - 1/|\epsilon_b|) & (ii) \end{cases} \quad (4.9)$$

avec  $\epsilon_i$  l'élasticité de la demande  $l_i^*$  par rapport au  $p_i$ ,  $i = h, b$ .

**Preuve :**

Les conditions du premier ordre du programme (4.8) sont :

$$\begin{cases} \pi \left( C'_h(l_h^*) + p_h^{FB} \right) \cdot \frac{\partial l_h^*}{\partial p_h} + \pi l_h^* = 0 \\ (1 - \pi) \left( C'_b(l_b^*) + p_b^{FB} \right) \cdot \frac{\partial l_b^*}{\partial p_b} + (1 - \pi) l_b^* = 0 \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} p_h^{FB} = -C'_h(l_h^*) - \frac{l_h^*}{\partial l_h^* / \partial p_h} \\ p_b^{FB} = -C'_b(l_b^*) - \frac{l_b^*}{\partial l_b^* / \partial p_b} \end{cases}$$

En multipliant le terme de droite de la première (respectivement seconde) équation par  $\frac{p_h^{FB}}{p_h}$  (respectivement par  $\frac{p_b^{FB}}{p_b}$ ), nous obtenons les conditions (4.9.i) et (4.9.ii). La Proposition 4.2 est démontrée. ♦

Le résultat de la proposition 4.2 est obtenu sans aucune contrainte sur la valeur de l'élasticité de la demande. Néanmoins, ces prix deviennent négatifs si  $|\varepsilon_i|$  est inférieur à un et ils doivent être interprétés comme des subventions dans ces cas. Toutefois, il est raisonnable de supposer que l'élasticité de la demande de la firme  $b$  est plus élevée, en valeur absolue, que celle de la firme  $h$ . Autrement dit, la demande de la firme  $b$  en permis est plus sensible aux variations de prix de permis que l'est la demande de la firme  $h$  puisque, comparé à la firme  $h$ , il est moins cher pour la firme  $b$  de dépolluer que d'acheter des permis. Enfin, trois cas peuvent être envisagés. Ils sont résumés dans la proposition 4.3 ci-après.

**Proposition 4.3**

*En situation d'information complète, les prix de premier rang se distinguent selon les trois situations suivantes :*

- (i) *Si  $|\varepsilon_h| > 1$  et  $|\varepsilon_b| > 1$ , les prix dans les deux contrats proposés sont positifs, c'est-à-dire que toute firme est contrainte de payer pour avoir des permis d'émission,*
- (ii) *Si  $|\varepsilon_h| < 1$  et  $|\varepsilon_b| < 1$ , les prix dans les deux contrats sont négatifs. Ainsi, l'activité de dépollution est subventionnée par le régulateur indépendamment du type de la firme,*
- (iii) *Si  $|\varepsilon_h| < 1$  et  $|\varepsilon_b| > 1$ , les firmes de type  $h$  sont subventionnées pour dépolluer tandis que les firmes de type  $b$  doivent payer pour polluer.*

**Preuve :**

la preuve est immédiate à partir du résultat de la proposition 4.2 et sous l'hypothèse que  $|\varepsilon_h| < |\varepsilon_b|$ . ♦

Même s'il n'y a pas de contrainte de participation, les firmes ont le choix de cesser leur activité. Ainsi, les firmes de petites élasticité traduisant des coûts de dépollution élevés doivent être subventionnées pour leur activité de dépollution. Dans d'autres cas, les prix peuvent être positifs et les firmes doivent acheter des permis pour chaque unité de pollution émise en raison de leur activité de production.

Maintenant, nous sommes en mesure de comparer les prix et les quantités entre les deux types à l'optimum de premier rang. Dans ce qui suit, nous considérons que l'élasticité est inférieure à l'unité<sup>1</sup>, ce qui correspond au cas où l'activité de dépollution est subventionnée par le régulateur. Cette analyse peut être facilement développée dans les deux autres cas de la proposition 4.3.

**Proposition 4.4**

Supposons que l'élasticité de la demande est inférieure à 1 en valeur absolue et considérons les scalaires  $\delta$  et  $\gamma$  tels que  $\delta = \frac{1}{4} \cdot \frac{|\varepsilon_b| - |\varepsilon_h|}{\left(1 - \frac{|\varepsilon_b| + |\varepsilon_h|}{2}\right)}$  et  $\gamma = \frac{1}{2} \cdot \frac{|\varepsilon_b| - |\varepsilon_h|}{|\varepsilon_b| + |\varepsilon_h|}$ .

Le menu de contrats du premier rang  $\{(p_h^{FB}, l_h^*), (p_b^{FB}, l_b^*)\}$  satisfait un des trois cas suivants :

- (i) Si  $\pi < 0.5 - \delta$ , alors  $l_b^* < l_h^*$  et  $p_b^{FB} > p_h^{FB}$ ,
- (ii) Si  $0.5 - \delta \leq \pi \leq 0.5 + \gamma$ , alors  $(l_b^* - l_h^*)$  est indéterminé et  $p_b^{FB} > p_h^{FB}$ ,
- (iii) Si  $0.5 + \gamma \leq \pi$ , alors  $(l_b^* - l_h^*)$  est indéterminé et  $p_b^{FB} < p_h^{FB}$ .

**Pour la preuve de la proposition 4.4, (voir Annexe A).♦**

La proposition 4.4 souligne l'importance de la composition de la population. En effet, si les firmes à faible coût sont assez nombreuses, elles obtiennent des proportions individuelles en permis inférieures à leur allocation totale  $(1 - \pi) \cdot l_b$ . Puis il devient plus coûteux pour elles de dépolluer (rappelons que nous obtenons ce résultat avec  $-C'_b(l_b) > -C'_h(l_h)$ ). Le régulateur peut fixer un prix des permis plus élevé pour elles afin de capturer l'ensemble du surplus, d'où l'explication de  $p_b > p_h$  au point (i).

Au contraire, si  $\pi$  est élevé, il doit devenir plus coûteux de polluer (par rapport aux cas (i) pour les firmes ayant des coûts élevés, d'où  $p_h > p_b$ ). Cela peut conduire à un niveau inférieur de permis pour chacune des firmes, mais

---

1. Supposons que l'élasticité de la demande de la firme est égale à l'unité, cela veut dire que si le prix du permis augmente de 10%, alors la demande de la firme en permis baisse du même pourcentage. Cette baisse reflète aussi l'augmentation de la capacité de dépollution de la firme qui est égale à 10%. Et comme par hypothèse la dépollution devient plus coûteuse au fur et à mesure qu'on dépollue ( $C'(x) < 0$ ), alors la demande de permis ne baissera pas de la même proportion que l'augmentation de prix. Ainsi, il est raisonnable de supposer que l'élasticité est inférieure à l'unité.

ce n'est pas systématique. En effet, dans certains cas, des firmes à coût élevé préfèrent payer un prix élevé pour obtenir des permis plutôt que de dépolluer plus que les firmes à faibles coûts. Ainsi,  $l_h$  peut être soit supérieur ou inférieur à  $l_b$ . Il s'agit du point (iii).

Enfin, dans le cas intermédiaire (ii),  $l_h - l_b$  est indéterminée, mais la population est suffisamment diversifiée pour obtenir le résultat  $p_b > p_h$ .

Finalement, ces optima ne sont plus des équilibres systématiques quand les informations sur les types de coût deviennent imparfaites.

## 4.4 Antisélection et distorsions de prix

Considérons maintenant le cas de l'antisélection. Le régulateur ne peut plus fixer les prix égaux aux précédents parce qu'un type de firmes, à savoir  $b$ , aura certaines incitations à mentir et à annoncer qu'il est un type  $h$ .

### 4.4.1 Optimum de second rang

L'incitation à mentir peut être levée en choisissant une différenciation adéquate des prix. Formellement, le régulateur doit prendre en compte les deux contraintes d'incitation associées à chaque type de firme. Néanmoins, comme expliqué dans la section 4.2, les règles réglementaires sont coûteuses pour les firmes et il n'est pas cohérent d'inclure quelques contraintes de participation. Si elles avaient le choix, les firmes décideraient toujours de ne pas participer à notre cadre statique. La fonction objectif est la même que dans la section précédente : le régulateur veut obliger les firmes à internaliser la pollution, due à leurs activités, aux prix qui minimisent le coût social total de dépollution.

D'après ce raisonnement, le programme du régulateur s'énonce comme suit :

$$\underset{p_h, p_b}{Min} \quad \pi (C_h(l_h^*) + p_h \cdot l_h^*) + (1 - \pi) (C_b(l_b^*) + p_b \cdot l_b^*) \quad (4.10)$$

$$s.c. \quad (C_h(l_h^*) + p_h \cdot l_h^*) - (C_h(l_b^*) + p_b \cdot l_b^*) \leq 0 \quad (4.11)$$

$$(C_b(l_b^*) + p_b \cdot l_b^*) - (C_b(l_h^*) + p_h \cdot l_h^*) \leq 0 \quad (4.12)$$

Les contraintes (4.11) et (4.12) prévoient que les prix doivent être décidés de façon à ce qu'aucune firme d'un type donné n'ait intérêt de choisir le contrat qui a été conçu pour l'autre type.

Notons  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  les multiplicateurs de lagrangien associés à (4.11) et (4.12). Trois cas doivent être considérés.

**Cas 1. Les deux contraintes sont saturées à l'optimum.**

Ainsi nous devons avoir simultanément :

$$\begin{aligned} C_h(l_h) + p_h \cdot l_h - C_h(l_b) - p_b \cdot l_b &= 0 \\ C_b(l_b) + p_b \cdot l_b - C_b(l_h) - p_h \cdot l_h &= 0 \end{aligned}$$

En les sommant, nous obtenons :

$$C_h(l_b) - C_b(l_b) = C_h(l_h) - C_b(l_h),$$

Avec  $l_h \neq l_b$ ,<sup>1</sup> cela n'est pas possible à cause de l'hypothèse 2. Finalement, les deux contraintes ne peuvent pas être simultanément saturées à l'optimum et le cas  $\lambda_1 > 0$  et  $\lambda_2 > 0$  doit être mis de côté.

**Cas 2. Aucune des contraintes n'est saturée.**

Ce cas signifierait que toutes les firmes n'ont jamais pas intérêt à mentir au sujet de leur type. Aucune d'elles ne trichera et l'optimum du premier rang s'applique. Nous avons vu ci-dessous que ce n'est pas possible dans le cas de l'antisélection. Le cas où  $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$  doit être écarté.

---

1. Si les quantités étaient égales, toutes les firmes choisiraient les contrats les moins chers.

**Cas 3. Une, et seulement une, contrainte est saturée.**

Parce que la firme  $b$  est le type qui a un certain intérêt à mentir, la contrainte d'incitation saturée est (4.12). Et la contrainte (4.11) ne doit plus être considérée dans le programme. Elle sera toujours satisfaite à l'optimum (de second rang).

Par conséquent, nous devons calculer :

$$\begin{aligned} \underset{p_h, p_b}{\text{Min}} \pi \left( C_h(l_h^*) + p_h \cdot l_h^* \right) + (1 - \pi) \left( C_b(l_b^*) + p_b \cdot l_b^* \right) \\ \text{s.c.} \quad \left( C_b(l_b^*) + p_b \cdot l_b^* \right) - \left( C_b(l_h^*) + p_h \cdot l_h^* \right) = 0 \end{aligned} \quad (4.13)$$

En remplaçant la contrainte dans la fonction objectif et en dérivant par rapport à  $p_h$ , la condition de premier ordre pour la firme de type  $h$  donne :

$$\begin{aligned} p_h &= -\pi C'_h(l_h^*) - (1 - \pi) C'_b(l_h^*) - l_h^* / \frac{\partial l_h^*}{\partial p_h} \\ &\Leftrightarrow p_h = \frac{-C'_h(l_h^*)}{1 - 1/|\varepsilon_h|} + a, \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\text{avec } a = \frac{(1-\pi) \cdot \left( C'_h(l_h^*) - C'_b(l_h^*) \right)}{1 - 1/|\varepsilon_h|} > 0.$$

Maintenant, en isolant  $p_h \cdot l_h$  dans la contrainte du programme (4.13), en remplaçant dans la fonction objectif et en la dérivant par rapport à  $p_b$  nous aurons :

$$p_b = \frac{-C'_b(l_b^*)}{1 - 1/|\varepsilon_b|} \quad (4.15)$$

**Proposition 4.5**

*Supposons que le régulateur connaît la structure de coût de type  $h$  et le type  $b$ , mais qu'il n'est pas capable de connaître le type d'une firme donnée. L'optimum de second rang est tel qu'il offre deux contrats, avec des prix unitaires de permis différenciés,  $(l_i^*, p_i); i = h, b$ . Les niveaux de permis  $l_i^*$  et les prix unitaires associés  $p_i$  sont déterminés par (4.5), (4.7), (4.14) et (4.15). Ils sont tels que :*

- (i) Les firmes de type  $h$  émettent  $l_h^*$  et achètent le volume équivalent en permis au prix  $p_h$ ,
- (ii) Les firmes de type  $b$  émettent  $l_b^*$  et achètent le volume équivalent en permis au prix  $p_b$ ,
- (iii) L'équilibre séparateur est tel que  $p_h > p_h^{FB}$  et  $p_b = p_b^{FB}$ .

**Preuve :**

Étant donné que ni les objectifs privés (4.4-4.5) des firmes, ni l'objectif social ont changé (4.3-4.3), les quantités de second rang sont celles obtenues dans le cas du premier rang  $l_i^* = l_i^*(l)$ ,  $i = h, b$ . En comparant les prix obtenus dans la proposition 4.2 avec (4.14) et (4.15), nous avons le point (iii). Enfin, les contrats ont été construits de façon qu'aucun type n'ait intérêt à mentir. Ainsi, chaque type choisit le contrat qui lui a été destiné (points (i) et (ii)).♦

Encore, ici les prix peuvent être négatifs si les élasticités de la demande sont inférieures à l'unité. Néanmoins, du point (iii) de la proposition 4.5, il est possible que les deux firmes payent un prix positif pour chaque unité de pollution, alors que dans le cadre d'information complète seul le « bon » type a été dans cette situation puisque la firme de type  $h$  est subventionnée. Ainsi, le réel  $a$ , strictement positif, peut conduire à un prix positif  $p_h$  même si  $p_h^{FB}$  est négatif dans le cas où  $|\varepsilon_h| < 1$ .

Comme dans un modèle classique de l'antisélection, une rente est donnée au « bon » type de façon à éviter la triche. Toutefois, cette rente n'est pas explicitement capturée par le prix unitaire des permis payés par les firmes de type  $b$ . En fait, elle est supportée par le type de coût élevé et entre dans son prix unitaire comme un montant qu'il doit payer en plus du prix de premier rang. Un tel résultat est obtenu parce que il n'y a pas de contrainte de participation à considérer dans notre contexte, comme expliqué plus haut (section 4.2). Néanmoins, les principales caractéristiques d'un équilibre séparateur, avec une rente négative pour les firmes du « mauvais » type, sont toujours valides : les quantités ne sont pas suffisantes pour séparer les types. La différenciation des prix est également nécessaire et une rente devrait être accordée au « bon » type de façon à éviter la triche. Ici, toutes les distorsions sont capturées par les prix et les quantités sont celles qui minimisent le coût social de la pollution.

## 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité de la régulation des émissions de pollution en présence d'antisélection. Ce problème illustre parfaitement, comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, un exemple d'asymétrie d'information entre la firme et le régulateur : seule la firme connaît son propre coût de dépollution. Le régulateur n'est pas en mesure de distinguer les firmes selon leur coût de dépollution même s'il est supposé que celui-ci connaît tous les coûts de dépollution possibles du secteur. Autrement dit, le régulateur sait « ce qui se fait », c'est-à-dire qu'il connaît tous les types de firmes du secteur. Mais, il ne sait pas « qui fait quoi », c'est à dire qu'il est incapable « d'étiqueter » les firmes selon leur coût.

Nous avons considéré un secteur d'activité composé de deux types de firmes : des firmes de type  $h$  à coût de dépollution élevé, les autres sont de type  $b$  dont leur coût de dépollution est faible. Sous ces conditions, la firme de type  $b$  a certain intérêt à se faire passer pour une firme de type  $h$  pour minimiser le coût de conformité associé à la réglementation. Nous utilisons les outils de la théorie des incitations afin de construire un mécanisme de régulation des émissions avec lequel les types de firmes pourraient être révélés.

Notons que le régulateur n'assure pas de profits minimums aux firmes pour garantir leur participation à la régulation, car ceci est contraire au principe pollueur-payeur que nous retenons. En effet, la réglementation de la pollution augmentera systématiquement le coût de la firme. Nous supposons, alors, que le régulateur peut user de son autorité pour obliger les firmes à participer à l'effort de dépollution.

En présence d'antisélection, les firmes à coût élevé paient les permis à un prix plus élevé que celui du *first best*. Les firmes à coût faible paient les permis au même prix du *first best*. Ce résultat laisse entendre l'existence d'une rente négative supporté par les firmes de coût élevé.

Depuis la signature du protocole de Kyoto, beaucoup de pays étaient incapables d'honorer leur engagement en matière de réduction des émissions de GES à cause de la hausse de la consommation qui se traduit, en générale, par une augmentation de celles-ci. Ainsi, en sus des efforts de limitation directe des émissions à l'aide de la taxe et des permis, on assiste à l'émergence des

appels à l'encouragement des technologies et des procédés présentant un fort potentiel d'économie des émissions. Il s'avère que certains instruments incitent plus à l'adoption de technologie que d'autres. Dans notre contexte, au lieu de manipuler la fonction de transfert, le régulateur pourrait également influencer le coût d'abattement par le choix d'instruments de régulation des émissions qui incitent à l'adoption de technologies de dépollution plus efficaces. Une telle perspective, est envisagée dans le chapitre suivant.

# Chapitre 5

## INCITATION À L'ADOPTION DE TECHNOLOGIES PROPRES

### 5.1 Introduction

Pour atteindre le niveau d'émission objectif prévu par la politique environnementale, une firme peut réduire son niveau de production sans changer sa technologie et ses entrants. Elle peut également atteindre le même but tout en gardant le même niveau de sortant voire l'augmenter grâce à des changements technologiques. Ces changements consistent à réduire la pollution selon deux conceptions : soit en aval du processus de production à l'aide des techniques en bout de chaîne (ou *end of pipe*) comme le traitement des déchets industriels, soit en amont via l'intégration d'un ensemble de pratiques ou de techniques. La première conception a l'inconvénient de générer des coûts plus élevés, notamment lorsque le niveau de dépollution fixé est important. Ainsi, depuis les années 90, on s'oriente davantage vers la deuxième conception, désignée par « l'écologie industrielle » (Frosch et Gallopoulos, 1989), qui consiste à diminuer la pollution dès la phase de conception du bien.

Nous avons étudié à travers les autres chapitres les instruments employés pour inciter à réduire la pollution, particulièrement la taxe et les permis. Ces instruments permettent de réaliser une double économie dans la mesure où ils

réduisent à la fois le coût marginal de dépollution et le niveau de dépollution. En outre, nous savons que lorsque les coûts marginaux de dépollution des firmes sont parfaitement connus du régulateur, taxes ou subventions et permis d'émission négociables sont équivalents quant à leur capacité d'atteindre l'objectif d'émission désiré (*cf.* chapitres 1 et 2). Toutefois, en situation d'information imparfaite sur les coûts de dépollution, chacun de ces instruments ne permet pas d'atteindre le niveau d'émission objectif fixé *ex-ante* avec la même efficacité que les autres. En effet, les permis d'émission permettent de garantir l'objectif quantitatif d'émission mais sans prévoir le coût de la réglementation. Au contraire, la taxe et la subvention permettent de maîtriser le coût de dépollution mais sans garantir l'obtention du niveau d'émission fixé. Ainsi, dans le contexte d'incertitude sur le coût de dépollution, la régulation des émissions par un système hybride est économiquement plus efficace que celle reposant sur des taxes, des subventions et des permis appliqués seuls (Roberts et Spence, 1976).

Par ailleurs, l'incitation des politiques environnementales à adopter des technologies moins polluante est fortement discutée ces dernières décennies. Ainsi, une littérature importante, dont par exemple Milliman et Prince (1989); Jung *et al.* (1996); Downing et White (1986), soutient que les taxes et les permis incitent différemment à adopter une technologie propre, malgré la capacité de ces instruments à atteindre le même niveau de dépollution lorsque le régulateur connaît parfaitement le coût de dépollution des firmes.

Selon Milliman et Prince (1989), la réglementation par des permis incite plus au changement technologique si la firme innovatrice peut s'approprier de la totalité des gains de l'innovation tirés par toutes les firmes. Au contraire, les taxes fournissent plus d'incitation relativement aux permis si on suppose que toutes les firmes peuvent innover (Fischer *et al.*, 2003) et ainsi aucune firme ne peut s'emparer de la totalité du gain du à la baisse du prix des permis.

Dans un cadre proche où les firmes sont en concurrence de telle sorte qu'elles ne peuvent pas influencer le prix de leur biens produits et où le régulateur est myope, c'est-à-dire n'anticipe pas l'apparition de la nouvelle technologie, Requate et Unold (2003) montrent que la taxe (ou la subven-

tion) incite le plus à l'innovation que les permis négociables. La question qui se pose est de savoir si ce résultat reste valable lorsque le régulateur ne connaît pas parfaitement les coûts de dépollution. La taxe (ou subvention) et les permis sont-ils plus incitatifs à adopter une technologie propre lorsqu'ils sont appliqués séparément que lorsqu'ils sont combinés dans un seul système ?

Pour répondre à ces questions, nous dépassons dans ce chapitre le cadre d'analyse de Requate (2005) pour étudier d'une part l'incitation au changement technologique procurée par la taxe et les permis ; lorsque l'information sur le coût de dépollution n'est pas parfaitement connue du régulateur. En outre, nous étendons le choix d'instrument de régulation des émissions à une combinaison taxe-permis (ou subvention-permis) car nous pensons que le système hybride est plus efficace en situation d'incertitude qui nous préoccupe. Nous supposons que le régulateur est myope. Cette hypothèse peut être justifiée en pratique par la longueur et la complexité du processus législatif.

Notons que, contrairement à Fischer *et al.* (2003) qui supposent qu'une firme innove et développe une technologie quelconque pour le compte d'autres firmes moyennant des rentes sous formes de licences, nous proposons ici un modèle atemporel, comme Requate et Unold (2003), que toute firme peut inventer ou adopter une technologie par investissement à un coût fixe et aucune rente n'est prévue. Ainsi, une baisse du prix des permis peut conduire certaines firmes à acheter des permis et ne pas adopter la technologie propre.

Après avoir exposé le cadre général du modèle dans la section 5.2, la section 5.3 fait l'objet d'une étude graphique effectuée par Requate et Unold (2003) sur l'incitation à adopter une technologie propre. Les auteurs supposent que le régulateur est myope et dispose d'information parfaite sur le coût de dépollution des firmes. Dans les sections 5.4 et 5.5, nous supposons, en revanche, que le régulateur connaît mal les coûts de dépollution et n'en dispose que d'une estimation. Ainsi, l'introduction d'un autre instrument de régulation de la pollution combinant taxe (ou subvention) et permis est utile dans ce contexte. Nous prévoyons une taxe payée par les firmes sur les unités

d'émission qui dépassent le niveau d'émission autorisé par les permis ainsi qu'une subvention versée aux firmes sur l'excédant de permis d'émission non utilisés. Indépendamment de son effet sur le changement technologique que nous traitons dans ce chapitre, nous savons qu'un instrument hybride taxe-permis est plus efficace que la taxe ou les permis (chapitres 2 et 3).

Nous montrons finalement qu'en présence d'incertitude sur les coûts d'abattement des firmes, celles-ci sont plus incitées à adopter des technologies propres lorsque la pollution est régulée par un instrument hybride que par une taxe ou des permis seulement. Par ailleurs, nous montrons que contrairement au cas d'information parfaite, en situation d'imperfection d'information la taxe incite le moins au changement technologique que les autres instruments. Toutefois, la première place au classement revient aux permis (resp. au système hybride) lorsque le coût marginal de la technologie propre est supérieur (resp. inférieur) au coût marginal estimé. La dernière section conclut le chapitre par un résumé des incitations d'adoption de technologies propres fournies par les différents instruments traités.

## 5.2 Cadre général du modèle et quantité optimale de pollution

Considérons des firmes émettrices d'un polluant en nombre suffisamment grand pour qu'elles soient en concurrence. Soit un processus modélisé en trois étapes. Dans la première étape, le régulateur impose la politique environnementale définie par  $P(x_0, p_0, s_0, t_0)$  où  $x_0$  est le niveau d'émission global autorisé,  $p_0$ ,  $s_0$  et  $t_0$  représentent le prix des émissions qui peut prendre respectivement la forme d'un prix de permis  $p_0$ , d'une subvention  $s_0$  ou d'une taxe  $t_0$ .

Comme il a été signalé plus haut, le régulateur a souvent une incertitude sur le coût de dépollution des firmes, il n'en connaît qu'une estimation sous forme d'une loi de probabilité. Dans ce chapitre, un système hybride est considéré afin de s'approcher le plus possible de l'objectif de dépollution optimal (Roberts et Spence, 1976). Concrètement, si le coût de dépollution

de la firme s'avère plus élevé que celui estimé par le régulateur, celle-ci est autorisée à polluer au delà de sa dotation initiale en contrepartie d'une taxe  $t_0$ . Au contraire, si le coût est plus faible que prévu, le régulateur intervient pour éviter la chute du prix des permis en achetant le surplus de dépollution en échange d'une subvention  $s_0$ .

À la deuxième étape, toute firme peut investir ou adopter une technologie propre. Nous utilisons le terme « propre » pour désigner tout savoir ou procédé susceptible de réduire les émissions plus que la technologie conventionnelle (usuelle ou classique). Nous retenons de la littérature qui traite l'incitation à la dépollution l'hypothèse de la myopie du régulateur (Downing et White, 1986; Milliman et Prince, 1989; Requate et Unold, 2003; Jung *et al.*, 1996). Selon cette hypothèse, le régulateur fixe le niveau d'émission  $x_0$  qui est optimal par rapport à la technologie conventionnelle, mais qui ne prévoit pas de le modifier suite aux réactions des firmes. La politique environnementale est établie *ex-ante* à cette étape. Ainsi, le prix des permis diminuera au fur et à mesure de l'adoption de la technologie propre.

Dans la troisième étape, en application de la politique environnementale, chaque firme acquiert une technologie propre et choisit le niveau d'émission qui minimise son coût de dépollution au prix d'émission donné  $p_0$ .

Rappelons ici les hypothèses de base de la modélisation de notre problème. Si les firmes sont en concurrence et n'influent pas sur le prix du sortant, nous n'avons pas besoin de prêter explicitement attention au marché du sortant<sup>1</sup>. Nous nous intéressons à la dépollution et ignorons l'aspect productif de la firme en normalisant la fonction de production à zéro. Nous avons  $n$  firmes de coûts de dépollution différents, la dépollution de la firme  $i$  a un coût noté  $C_i(x_i)$  qui représente le coût de dépollution d'un niveau maximum  $\bar{x}_i$  (obtenu sans réglementation) à un niveau d'émission plus faible  $x_i \in [0, \bar{x}_i]$ . Ce coût vérifie les propriétés suivantes :  $C_i(x_i) > 0$ ,  $-C_{x_i} > 0$ , et  $C_{x_i x_i} > 0$  pour tout  $x_i < \bar{x}_i$  et  $C_i(x_i) = 0$  pour tout  $x_i \geq \bar{x}_i$ . En outre, le régulateur observe le niveau d'émission des firmes dans la section 5.3, mais ne l'observe pas dans

---

1. Requate (2005, note de bas de page 3, p.177)

les sections 5.4 et 5.5 puisque celui-ci ne connaît pas parfaitement les coûts de dépollution. Ainsi, le niveau de dépollution à atteindre est fixé sur la base d'une estimation des coûts de dépollution des firmes.

Nous considérons, par ailleurs, que l'imperfection de l'information supposée dans les sections 5.4 et 5.5 favorise l'adoption d'un système mixte qui se révèle plus efficace pour réguler la pollution que la taxe ou les permis adoptés séparément (Roberts et Spence, 1976).

Nous supposons encore que les émissions sont réparties entre les firmes de façon à minimiser le coût agrégé de dépollution, c'est-à-dire de façon à égaliser les coûts marginaux de toutes les firmes. Pour illustrer notre propos, supposons que le régulateur cherche à atteindre une quantité de pollution totale  $x$ . De plus, supposons que le régulateur distribue l'effort de dépollution entre deux firmes de telle façon qu'une firme ait un coût marginal de dépollution plus élevé que l'autre. Cette situation n'est pas efficace car le coût agrégé de dépollution peut être réduit davantage sans réduire la quantité de dépollution totale. En fait, ce coût peut être réduit uniquement en diminuant d'une unité la quantité dépolluée par la firme qui a un coût de dépollution élevé tout en augmentant d'une unité la quantité dépolluée par la firme qui a le coût de dépollution bas. Ainsi, en étendant ce raisonnement pour toutes les firmes, cette action peut être répétée autant de fois que nécessaire jusqu'à l'égalisation des coûts marginaux de dépollution des deux firmes, on alors <sup>1</sup> :

$$C_{x_i}^i(x_i) = C_{x_j}^j(x_j) \quad \forall i, j \quad (5.1)$$

De ce fait, nous pouvons représenter toutes les firmes du secteur polluant par une firme représentative<sup>2</sup> et désormais, les  $i$  en indice ou en exposant

---

1. Ce résultat a été démontré formellement dans le chapitre 2

2. Le problème de l'agrégation peut être résolu par application d'une approche par convergence (Theil, 1971; Kempf et Henocq, 1984). D'après cette approche, on peut supposer que les fonctions de coûts des firmes  $C^i(x_i)$  sont différentes mais qui sont distribuées autour d'une fonction représentative linéaire  $C(x)$  quelconque. En faisant tendre le nombre de firmes vers l'infini, on a  $\sum_{i=1}^n C^i(x_i) \approx nC(x)$ , l'erreur est quasiment nulle et peut être

disparaissent.

L'émission du polluant provoque un dommage environnemental représenté par une fonction décroissante et convexe des émissions.

$$D = D(x), D_x > 0, D_{xx} > 0$$

est une connaissance commune.

La fonction objectif du régulateur est une fonction de coût social de dépollution, notée  $C^s$ , définie comme la somme des coûts de dépollution privés des firmes et du dommage agrégé. Elle s'écrit de la façon suivante :

$$C^s(x) = C(x) + D(x) \tag{5.2}$$

La convexité de  $C^s(x)$  est une conséquence de la convexité de  $C(x)$  et de  $D(x)$ , d'où l'existence d'un niveau d'émission qui minimise le coût social. Ce niveau vérifie :

$$x^* = \operatorname{argmin} C^s(x) \Leftrightarrow -C_x(x) = D_x(x) \tag{5.3}$$

L'équation (5.3) montre que le régulateur choisit le niveau de dépollution qui égalise le bénéfice marginal de dépollution social et le dommage marginal social.

Supposons qu'avant l'investissement, la firme représentative dispose d'une technologie conventionnelle représentée par le coût total de dépollution  $-C^0(x)$ , avec  $C_x^0(x)$  son coût marginal de dépollution<sup>1</sup>. L'adoption d'une technologie propre, représentée par le coût total  $-C^1(x)$  et le coût marginal  $C_x^1(x)$ , permet à la firme de réduire son coût marginal de  $C^0(x)$  à  $C^1(x)$  pour un niveau d'émission donné  $x$  avec :

---

négligée.

1. ou  $-C_x^0(x)$  si on raisonne en terme de bénéfice ou d'économie marginale de dépollution

$$-C_x^1(x) < -C_x^0(x) \quad \text{pour tout } x < \bar{x}_0$$

En outre, l'adoption de la technologie propre entraîne un coût fixe  $F > 0$  (le coût d'installation par exemple). Nous nous limitons ici à l'adoption de la technologie. Cette question est traitée dans le cadre d'un modèle d'équilibre partiel. L'incitation au changement technologique est modélisée par le gain additionnel quant au prix et au volume d'émission occasionnés par le passage de la technologie conventionnelle à la technologie propre. Pour un prix de marché d'émission  $q$  qui peut être un prix de permis ou une taxe, l'incitation exprimée en ce qui concerne le bénéfice net de dépollution s'écrit :

$$\mathfrak{B} = - \left[ \underbrace{\int_{x_0(q)}^{\bar{x}_0} C_x^0(x) dx + \int_{x_1(q)}^{x_0(q)} q dx}_{\text{Coût dépol. avec tech. 0}} - \underbrace{\int_{x_1(q)}^{\bar{x}_1} C_x^1(x) dx}_{\text{Coût dépol. avec tech. 1}} - F \right] \quad (5.4)$$

Ainsi, la firme n'a intérêt à investir pour adopter la nouvelle technologie que si  $\mathfrak{B} > 0$ .

En absence de réglementation des activités polluantes, il est raisonnable d'affirmer que les firmes ne cherchent pas à changer leur technologie à moins que ce changement augmente leur productivité. Nous avons étudié plusieurs instruments utilisés pour réguler la pollution, notamment les instruments économiques. Nous savons en particulier que lorsque l'information est parfaite, les systèmes de taxe (ou de subvention) et de permis sont équivalents, du moins à court terme pour la subvention. Dans la section suivante, nous discutons la capacité de la taxe et du permis à inciter au changement technologique.

## 5.3 Information parfaite du coût de dépollution

Le but de cette section est de montrer, à l'aide d'une analyse graphique, comme Requate (2005), que d'une part l'adoption de la technologie propre permet à la firme de réduire à la fois ses émissions en polluant et ses paiements pour se conformer aux exigences de la politique de réglementation de la pollution et de comparer, d'autre part, l'incitation à adopter la technologie propre lorsque la pollution est régulée par une taxe ou par un permis. Nous supposons ici que le régulateur est en mesure de connaître parfaitement le coût de dépollution de la firme. Par conséquent, la régulation par taxe ou par permis aboutit au même niveau de dépollution qui correspond à l'optimum social.

### 5.3.1 Régulation de la pollution par une taxe

La régulation de la pollution par une taxe (comme par des permis) a l'avantage d'inciter à la dépollution au moindre coût (chapitre 1). Sur la fig. (5.1), la courbe  $C_x^0$  représente le coût marginal de la firme lorsqu'elle utilise une technologie conventionnelle. Sans aucune régulation des émissions de pollution, il est moins coûteux pour la firme de ne rien dépenser (à la marge) pour dépolluer. Autrement dit la firme choisit le niveau d'émission  $\bar{x}_0$ .

Le régulateur connaît parfaitement le coût de dépollution de la firme sur la base de la technologie conventionnelle. Ainsi, en application de sa politique de régulation de pollution, celui-ci annonce une taxe  $t_0$  afin d'implémenter le niveau d'émission optimal  $x_0^*$ . Dans la suite, nous noterons  $x_0^*(t_0)$  : le niveau choisi par la firme lorsque le prix des émissions est  $t_0$ . Ce niveau égalise le coût marginal social  $C_x^0(x)$  au dommage marginal social de dépollution,  $D_x(x)$ . C'est-à-dire, le régulateur voudrait que la firme représentative dépollue la quantité  $(\bar{x}_0 - x_0^*(t_0))$ .

L'adoption de la technologie propre, à quantité de sortant inchangée, est suivie par la baisse du coût marginal de dépollution qui devient  $C_x^1(x)$ . Cette baisse se traduit par un déplacement horizontal de la courbe vers l'origine, une baisse du niveau de dépollution maximal et du niveau de dépollution

socialement optimal qui deviennent respectivement  $\bar{x}_1$  et  $x_1^*(t_1)$ . Sachant que le niveau de dépollution imposé à la firme ne change pas, puisqu'il est supposé que le régulateur est myope, l'adoption de la technologie propre a pour effet de permettre simultanément deux économies. La première d'entre elles correspond à une économie en coût de dépollution résultant de la baisse des émissions indépendamment de la politique de régulation mise en place. Cette économie est le résultat direct de l'acquisition de la technologie propre et correspond à l'aire hachurée *A*. La seconde correspond à une économie en prix de dépollution résultant de la baisse du coût marginal de dépollution et qui, au contraire, dépend de l'instrument de régulation mis en place. Elle est représentée par l'aire hachurée *B* comme le montre la figure 5.1.

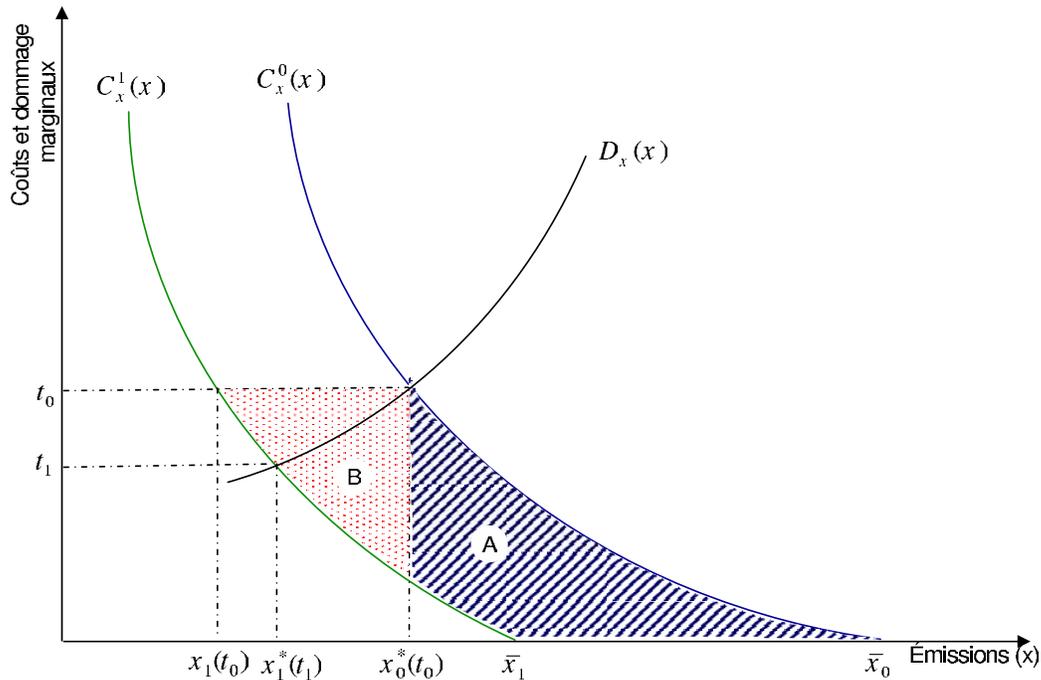


FIGURE 5.1 – Incitation à l'adoption de la technologie propre lorsque la pollution est régulée par la taxe

Finalement, suite à l'adoption de la technologie propre, la firme réalise une économie totale équivalente à l'aire  $A + B$ , tandis que le coût de l'acquisition de la technologie propre est égal à  $F$  par hypothèse. Ainsi, il est rationnel que la firme adopte la technologie propre si  $A + B > F$ .

Notons que sans l'hypothèse de myopie du régulateur, la taxe à payer devient  $t_1$  et correspond au prix qui égalise le coût marginal de dépollution sur la base de la technologie propre, tandis que le dommage marginal de dépollution qui reste inchangé. Par conséquent, l'incitation à acquérir la technologie propre devra baisser.

### 5.3.2 Régulation de la pollution par des permis

Nous étudions maintenant l'incitation à l'adoption de la technologie propre lorsque la pollution est régulée par des permis. Comme dans le cas de la dépollution par une taxe, et toujours dans l'esprit de Requate (2005), nous reprenons l'analyse dans cette sous section en retenant l'hypothèse de connaissance parfaite du coût de dépollution de la firme représentative.

En adoptant la technologie propre, un déplacement de la courbe de coût marginal similaire à ce qui a été décrit dans le cas de la taxe peut être constaté. Par conséquent, en suivant Weitzman, le prix des permis d'émission devrait fournir la même incitation à la baisse de  $x$ . Mais ici, la firme est autorisée à échanger (vendre ou acheter) l'équivalent de la quantité dépolluée des émissions sur le marché de permis. Ainsi, l'incitation au changement technologique ne sera pas équivalente à celle générée par la taxe.

Comme nous pouvons le voir sur la figure 5.3, le régulateur fixe le prix des permis au  $p_0$ . Ce prix égalise le coût marginal de dépollution de la technologie conventionnelle  $C_x^0(x)$  et le dommage marginal  $D_x(x)$ , soit  $x_0(p_0)$ . En réponse à ce prix, les firmes demandent la quantité de permis qui leur permet d'honorer leurs engagements en matière de dépollution. La demande des firmes en permis dépend de l'adoption de la technologie et du degré de sa diffusion. Ainsi, nous pouvons distinguer trois cas :

- i) Si aucune firme n'adopte la technologie propre, la demande des permis correspond exactement au niveau de dépollution socialement optimal (tout en supposant que le régulateur est myope)  $x_0(p_0)$ , ce cas ne fait pas l'objet de ce chapitre puisque nous supposons un changement tech-

- nologique.
- ii) Si la technologie propre est partiellement diffusée, c'est-à-dire adoptée uniquement par certaines firmes, la demande en permis est inférieure à l'offre et correspond au niveau d'émission  $x_1(p_1)$  vendue par le régulateur au prix  $p_1$ . Cette demande en permis devrait baisser, ainsi que le prix du permis, au fur et à mesure que les firmes adoptent la technologie jusqu'à la diffusion complète de la technologie. L'étude de la diffusion partielle n'est compatible avec la firme représentative que pour une technologie propre qui ne fonctionne pas à plein capacité dès l'installation. Ce cas est illustré par la figure 5.2 où l'économie procurée par le changement technologique est équivalente à l'aire  $A_1 + A_2 + B_1 + B_2 + B_3$ , pendant que le coût d'acquisition de la technologie propre est toujours égale à  $F$ . Il en découle que la demande en permis correspond à  $x_1(p_1)$ , le reste des émissions est régularisé à l'aide d'une taxe au taux  $t_0 = p_0$ . Constituant un cas particulier, ce cas est traité à titre de remarque et ne fait pas l'objet de ce chapitre. Ainsi, nous nous limitons au cas où la diffusion de la technologie propre est complète.
- iii) Lorsque la diffusion de la technologie est complète, c'est-à-dire qu'elle est adoptée par toutes les firmes, la capacité de dépollution des firmes ( $x_1^*(p^*)$ ) excède le niveau de dépollution exigé par le régulateur ( $x_0(p_0)$ ). Cette situation est décrite dans la figure 5.3 et a pour effet de baisser le prix des permis à  $p^*$ . Par conséquent, l'économie nette du coût d'acquisition est égale à  $A_1 + B_1 - F < A + B - F$ .

Nous montrons finalement, comme l'a fait Requate (2005), que la taxe incite mieux à l'adoption de technologie que le permis et on obtient la proposition suivante :

**Proposition 5.1 (Résultat de Requate et Unold (2003))**

*En situation d'information parfaite, les firmes sont plus prêtes à dépenser pour adopter la technologie propre lorsque la pollution est régulée par une taxe que si elle est régulée par des permis.*

Dans cette section, il est démontré qu'en situation d'information parfaite

sur le coût de dépollution, la régulation par taxe est plus incitative au changement technologique que par permis. Ce résultat constitue un argument supplémentaire en faveur de l'utilisation de la taxe par rapport aux permis dans le contrôle de la pollution. Mais, ce résultat tient-il encore si l'information est imparfaite ? Dans la section suivante, qui fait l'objet de l'apport essentiel de ce chapitre, nous étendons le travail de Requate et Unold (2003) au cas d'imperfection de l'information concernant le coût de dépollution tout en envisageant le cas de la régulation de la pollution par l'instrument hybride non traité dans la section précédente.

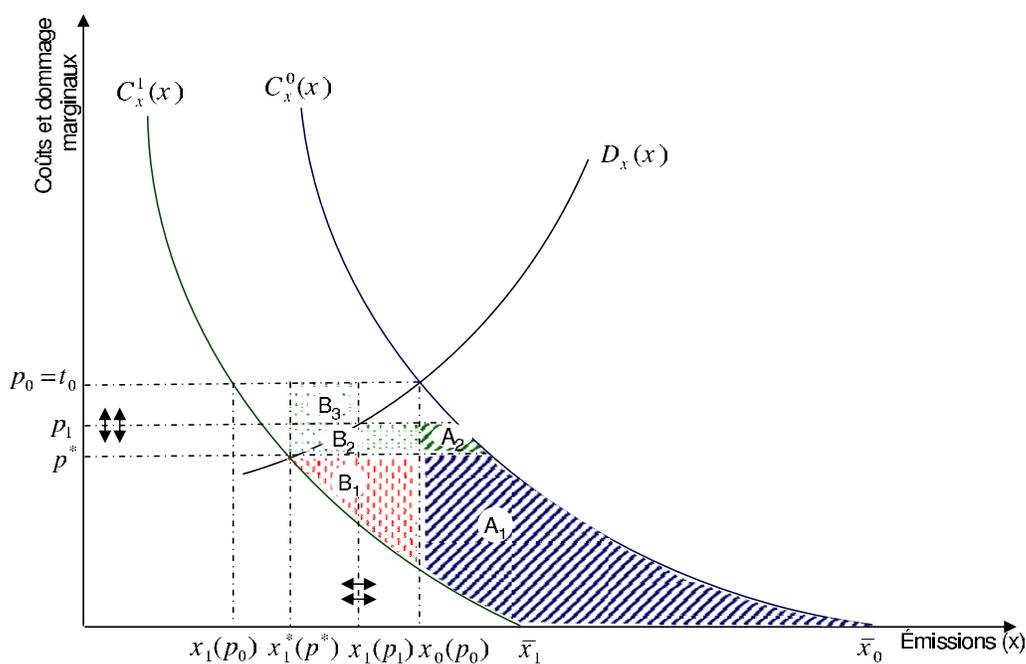


FIGURE 5.2 – Incitation à adopter la technologie propre lorsque la pollution est régulée par des permis : diffusion partielle de la technologie

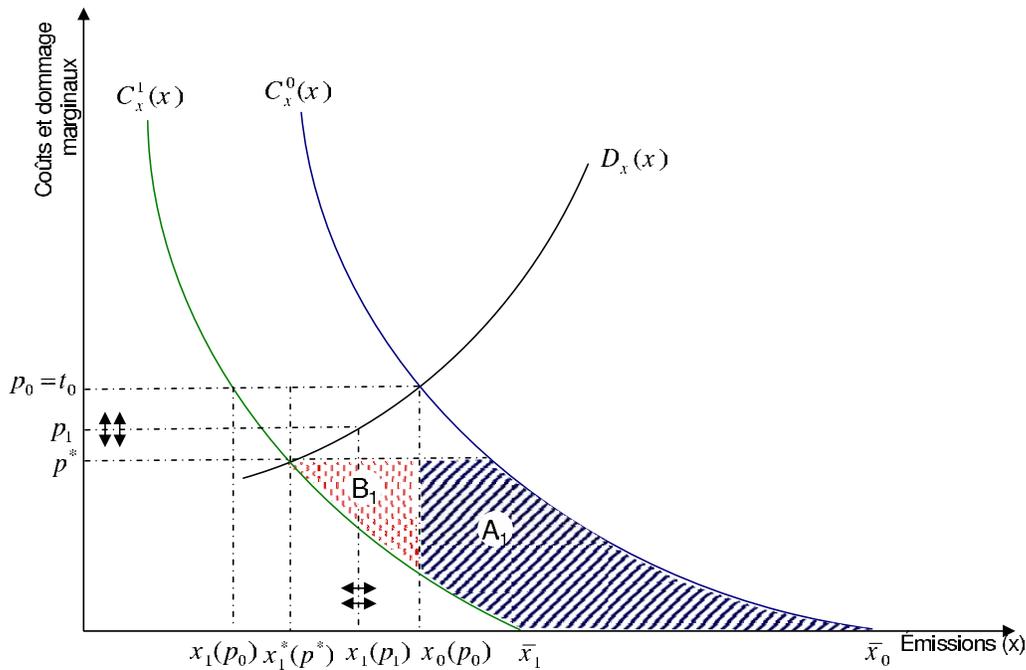


FIGURE 5.3 – Incitation à adopter la technologie propre lorsque la pollution est régulée par des permis : diffusion complète de la technologie

## 5.4 Surestimation du coût marginal de dépollution

En présence d'incertitude sur le coût de dépollution des firmes, le régulateur peut commettre des erreurs d'estimation du coût agrégé de dépollution. Cette erreur influe négativement sur l'efficacité économique et environnementale des outils mis en place pour réguler la pollution. Pour remédier au problème d'incertitude sur le coût de dépollution, nous optons ici pour un système hybride qui permet d'approcher la solution optimale (chapitres 2 et 3). Concrètement, pour éviter l'effondrement du prix des permis suite à une surestimation du coût marginal de dépollution, le régulateur prévoit de racheter les permis qui ne sont pas utilisés moyennant une subvention  $s$ . À l'inverse, les firmes sont autorisées à émettre plus que ce que leur permet leur allocation en permis en contrepartie d'une taxe  $t$ . Nous retenons dans cette section que le régulateur est myope, et surestime le coût marginal de la firme

utilisant la technologie conventionnelle. Cela correspond au cas où le coût surestimé est supérieur au coût marginal de dépollution de la firme lorsque elle utilise la technologie propre.

Considérons  $\hat{C}_x^0$  une estimation qui se révèle plus élevée que le coût réel de la firme  $C_x^0$ . D'abord, le régulateur propose les permis à un prix qui égalise le coût marginal de dépollution surestimé et le dommage marginal parfaitement connu du régulateur. Sachant que la firme réagit en fonction de son coût et non pas en fonction de celui estimé par le régulateur, l'adoption de la technologie propre fait apparaître un effet d'augmentation ou de diminution, selon le cas, des économies  $A$  et  $B$  avancées dans la section 5.3. Nous étudions dans la section suivante l'incitation au changement technologique lorsque la pollution est régulée par une taxe.

## Taxe

Sur la figure 5.4, nous pouvons constater qu'en surestimant le coût d'abattement des firmes, le régulateur fixe l'objectif d'émission à un niveau plus faible que prévu c'est-à-dire  $x(\hat{t})$ . Ce niveau correspond à un niveau de dépollution plus laxiste au regard de la capacité de dépollution de la technologie conventionnelle qui permet de l'atteindre au coût  $C_x^0(x(\hat{t}))$ . En outre, l'adoption de la technologie propre permet de réduire davantage le coût de dépollution qui est égal à  $C_x^1(x(\hat{t}))$ . Cependant, l'écart constaté entre le niveau de dépollution objectif et le potentiel à dépolluer de la technologie propre ne peut pas être exploité par la firme car la régulation de la pollution par la taxe ne lui permet pas de valoriser toutes les économies engendrées par la technologie propre. Ainsi, seule l'économie en coût de dépollution peut être constatée. Cette dernière résulte de la baisse des émissions indépendamment de la politique de régulation et est représentée par l'aire  $A_1$  sur la figure 5.4.

L'incitation à l'adoption de la technologie propre se limite dans l'économie représentée par l'aire  $A_1$  diminuée du coût d'installation fixe de la technologie propre,  $F$ . Cette incitation est inférieure à celle fournie lorsque la pollution

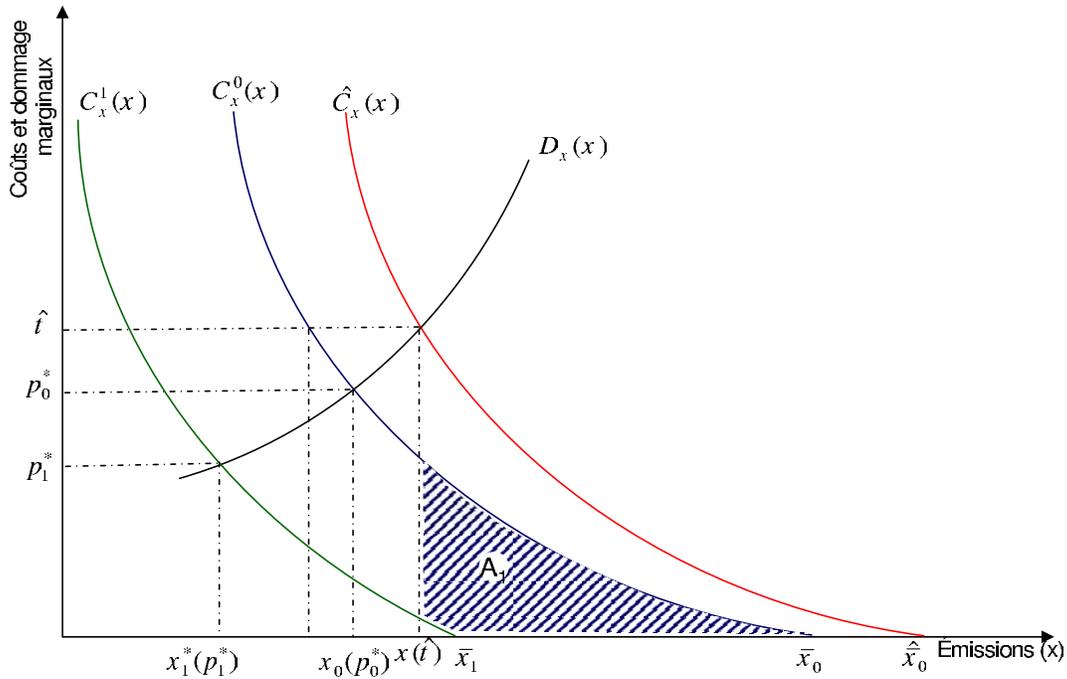


FIGURE 5.4 – Incitation à l'adoption de la technologie propre lorsque la pollution est régulée par la taxe

est régulée par le même instrument mais en connaissance parfaite du coût de dépollution.

## Permis

La nouveauté par rapport au cas de la régulation par la taxe est que les firmes dont le coût de dépollution est faible, peuvent transformer en permis leur capacité à dépolluer plus que ce qui est exigé par le régulateur. À l'inverse, les firmes dont le coût de dépollution est élevé doivent acheter des permis en contrepartie des émissions excédant le niveau d'émission fixé. Les permis s'échangent sur un marché où le régulateur offre l'équivalent de l'objectif de dépollution en permis. Sur la figure 5.5, nous pouvons lire le niveau de pollution  $x(\hat{p})$  qui égalise le coût marginal de dépollution estimé et le dommage marginal de dépollution. En cherchant à implémenter ce niveau de pollution, le régulateur émet l'équivalent de la quantité d'émission à dépolluer en permis. Or, le niveau d'émission optimal atteint par la techno-

logie conventionnelle est  $x_0(p_0^*)$ . Ainsi, l'objectif fixé par le régulateur peut être atteint à un coût inférieur au prix prévu par celui-ci  $\hat{p}$  en utilisant la technologie conventionnelle. Ce coût baisse davantage à mesure que les firmes adoptent la technologie propre. D'où, l'objectif d'émission peut être atteint à l'équilibre uniquement au prix  $p_1(x(\hat{p}))$ .

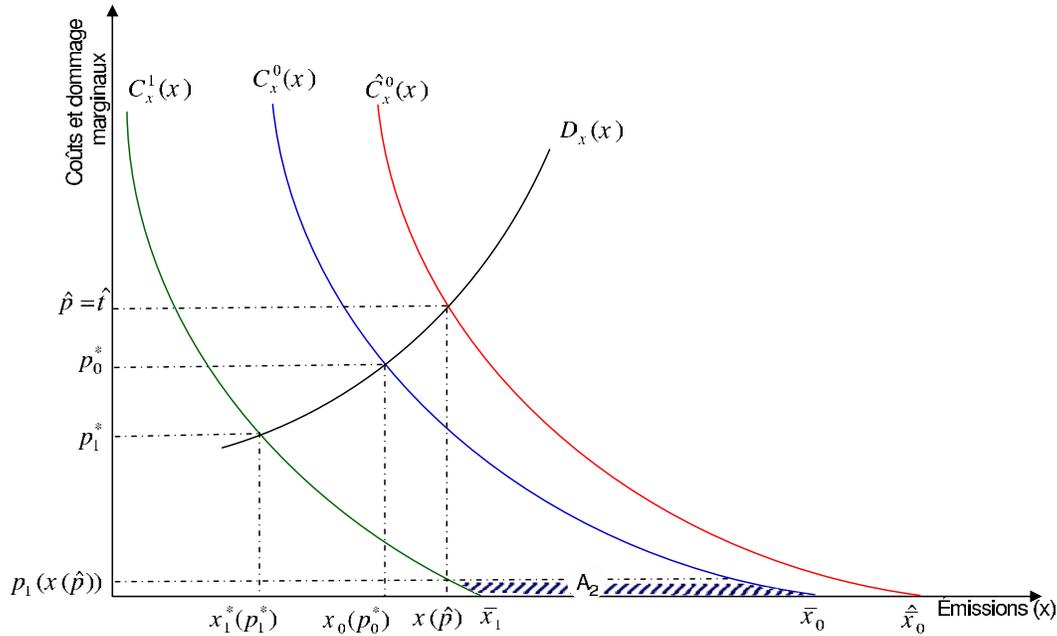


FIGURE 5.5 – Incitation à l'adoption de la technologie propre lorsque la pollution est régulée par des permis

En adoptant la technologie propre, la firme permet de réaliser une économie correspondant à la partie hachurée  $A_2 < A_1$ . Par conséquent, l'incitation au changement technologique est égale à  $A_2 - F$ . Nous constatons que l'incitation procurée ici est plus faible que si le coût de dépollution est parfaitement connu (figure 5.3).

### Combinaison permis-subvention

Nous savons que la régulation par taxe ou par permis, seuls, ne permet pas d'atteindre le niveau de dépollution socialement efficace. Une combinaison des deux instruments permet de l'approcher. Ainsi, dans cette sous-section le régulateur prévoit de verser une subvention (ou d'imposer une taxe

négative) pour les firmes qui émettent moins que le niveau d'émission à atteindre, soit  $x(\hat{p})$ . Nous suivons Roberts et Spence (1976) pour fixer cette subvention de telle sorte qu'à l'équilibre  $p_1^* < s < \hat{p}$ .

Nous constatons, d'après la figure 5.6, que lorsque toutes les firmes adoptent la technologie propre, le niveau optimal d'émission devient  $x_1^*(p_1^*)$ . Or, atteindre le niveau d'émission fixé  $x(\hat{p})$  ne coûte que  $p_1(x(\hat{p}))$  en utilisant la technologie propre. À ce prix, la firme réalise deux types d'économie : une première, directe, fournie par l'adoption de la technologie propre et représentée par l'aire  $A_2$ . La seconde, indirecte, est entraînée par la surestimation du coût de dépollution. Sachant que le régulateur propose une subvention  $s$  sur les unités de pollution qui excèdent le niveau à atteindre, cette économie est équivalente à l'aire  $B_2$ . De ce fait, l'incitation à l'adoption de la technologie propre est équivalente à la réunion des deux aires  $A_2$  et  $B_2$  diminuée du coût d'installation fixe de la technologie propre,  $F$ .

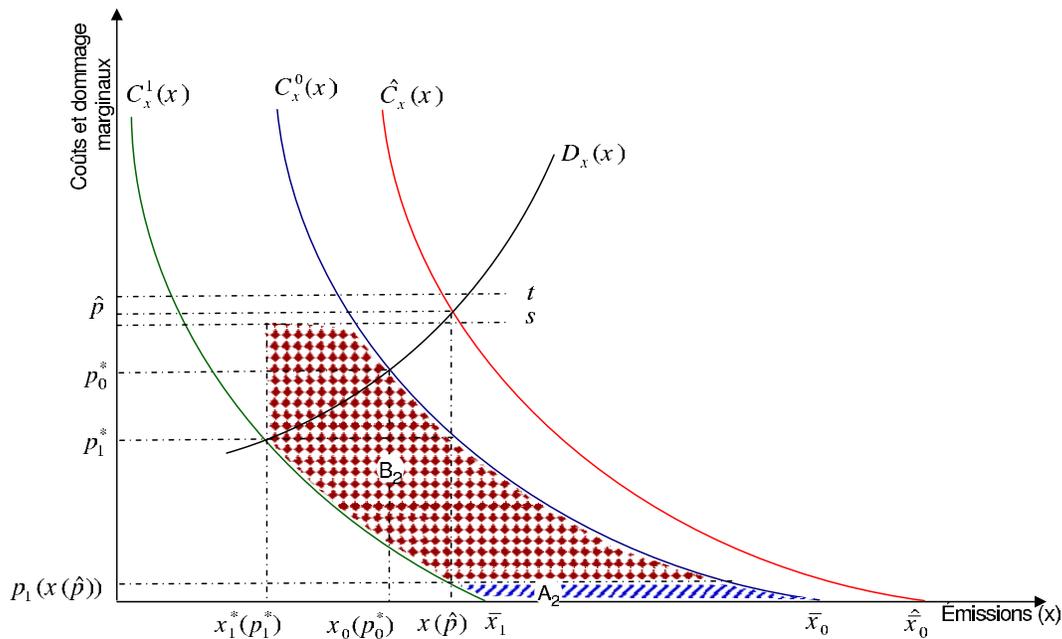


FIGURE 5.6 – Incitation à adopter la technologie propre lorsque la pollution est régulée par une combinaison permis-subvention

Finalement, une comparaison de l'incitation au changement technologique

lorsque la pollution est régulée par une taxe ( $A_1 - F$ ), par des permis ( $A_2 - F$ ) et par une combinaison taxe-permis ( $A_2 + B_2 - F$ ), permet de classer les instruments de régulation de la pollution selon le degré d'incitation au changement technologique. La proposition suivante résume les résultats de cette section :

**Proposition 5.2**

- i) *La régulation de la pollution par un système de taxe ou de permis se révèle plus incitative au changement technologique si le coût est parfaitement connu que s'il est surestimé.*
- ii) *Que le coût soit parfaitement connu ou surestimé par le régulateur, l'incitation est plus forte lorsque la pollution est régulée par une taxe que si elle est régulée par des permis.*
- iii) *Si le coût de dépollution est surestimé, les firmes sont prêtes à dépenser plus pour acquérir la technologie propre lorsque la pollution est régulée par une combinaison permis-subsidation que lorsqu'elle est régulée par une taxe. La régulation de la pollution par des permis entraîne l'incitation au changement technologique la plus faible relativement aux deux autres instruments.*

## 5.5 Sous estimation du coût marginal de dépollution

### 5.5.1 Cas d'une innovation radicale

Nous étudions dans cette section le cas où le coût de dépollution est sous estimé par le régulateur, particulièrement lorsque la baisse du coût, provoquée par l'adoption de la nouvelle technologie, est suffisante pour annuler l'erreur de sous estimation du coût commise par le régulateur. Cela pourrait être le cas, par exemple, d'une invention radicale permettant de réduire intensément les émissions tandis que la politique de régulation de la pollution s'est basée sur une dépollution par une technologie conventionnelle peu efficace.

## Taxe

En supposant maintenant que le régulateur sous estime le coût de dépollution des firmes, celui-ci fixe la taxe  $\check{t}$  telle que le coût marginal de dépollution estimé  $\check{C}_x(x)$  égale le dommage marginal  $D_x(x)$  et prévoit l'implémentation du niveau d'émission à atteindre  $x(\check{t})$  (figure 5.7). Toutefois, l'émission de ce niveau en utilisant la technologie propre ne coûte (à la marge) que  $p_1(x(\check{t}))$ .

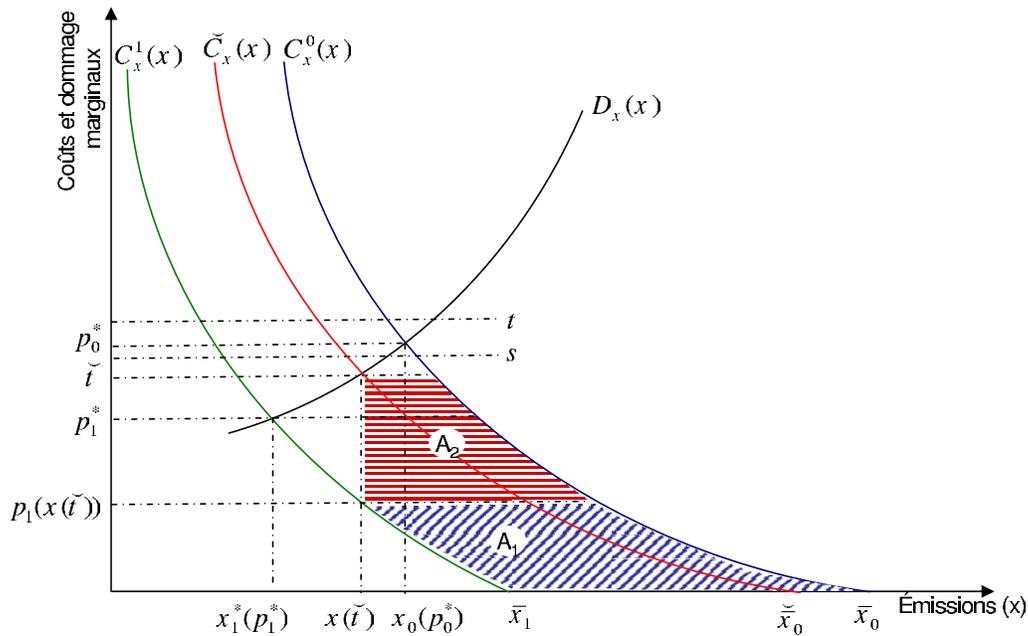


FIGURE 5.7 – Incitation à adopter la technologie propre lorsque la pollution est régulée par la taxe

La régulation par la taxe a la particularité de dépolluer au prix fixé par erreur au  $x(\check{t})$  et non au prix du marché  $p_1(x(\check{t}))$ . Ainsi, l'économie entraînée suite à l'adoption de la technologie propre est équivalente à la réunion des aires  $A_1$  et  $A_2$  diminuée du coût d'installation fixe de la technologie propre,  $F$ .

### Proposition 5.3

*La régulation de la pollution par une taxe est plus incitative au changement technologique si l'information est parfaite que si l'information est imparfaite.*

### Permis

Ici, la régulation de la pollution se fait à l'aide des permis. Ainsi, au lieu d'imposer une taxe, le régulateur fixe le prix d'émission  $\check{p}$  en s'attendant au niveau d'émission  $x(\check{p})$ . Or, d'après la figure 5.8, ce niveau peut être atteint seulement au prix  $p_1(x(\check{p}))$  si la technologie propre a été adoptée.

Contrairement à la régulation par taxe, la régulation par des permis à l'avantage de permettre aux firmes dont le coût de dépollution est faible de transformer l'équivalent des émissions réduites en permis échangeables sur le marché au même titre que les permis proposés par le régulateur. Ainsi, à l'équilibre, l'adoption de la technologie propre entraîne une baisse du prix des permis à  $p_1(x(\check{t}))$  et fait apparaître une économie représentée par l'aire  $A_1$ .

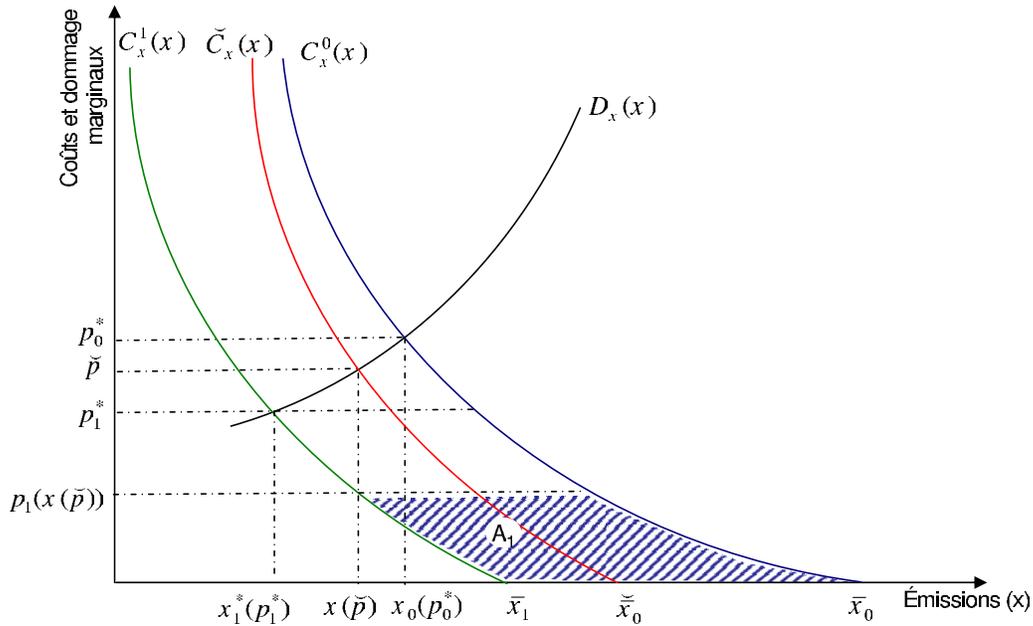


FIGURE 5.8 — Incitation à adopter la technologie propre lorsque la pollution est régulée par des permis

Finalement, l'incitation à l'adoption de technologie propre est équivalente à  $A_1 - F$ .

### Combinaison permis-subvention

Concrètement, ici le régulateur propose une subvention pour pallier à une baisse du prix du permis lorsqu'il s'avère qu'il a sous estimé le coût de dépollution. Comme montré sur la figure 5.9, l'objectif est le même que dans les deux dernières sous-sections, soit atteindre le niveau d'émission  $x(\hat{p})$ , et les permis nécessaires pour atteindre ce niveau s'échangent au prix  $p_1(x(\hat{p}))$ . Toutefois, ici le régulateur propose une subvention  $s$  sur toutes les unités de pollution dépolluées au-delà de l'objectif d'émission.

Ainsi, on distingue trois types d'économie :

- (i) Une économie sur le coût de dépollution représentée sur la figure par  $A_1$ ,
- (ii) Une économie sur le prix d'émission réalisée sur le niveau d'émission à atteindre ( $A_2$ ),
- (iii) Une économie sur le prix d'émission réalisée sur les unités d'émission dépolluées au-delà de l'objectif exigé par le régulateur ( $A_3$ ).

Finalement, l'incitation à adopter la technologie propre est équivalente à l'ensemble des aires auquel on déduit le coût d'installation de la technologie propre, soit  $A_1 + A_2 + A_3 - F$ .

Une comparaison des trois figures 5.7, 5.8 et 5.9 montre que l'incitation au changement technologique est plus forte si la pollution est régulée par une combinaison que si elle est régulée par une taxe. Les permis fournissent l'incitation la plus faible à l'adoption de la technologie propre.

Ce résultat est identique à celui observé lorsque le coût est surestimé. Cela s'explique par le fait que même si le régulateur sous estime le coût de dépollution de la technologie conventionnelle, l'erreur d'estimation reste inférieure à l'effet positif de l'adoption de la technologie propre sur le coût de dépollution. Nous pouvons ainsi généraliser le résultat des deux sections par la proposition suivante :

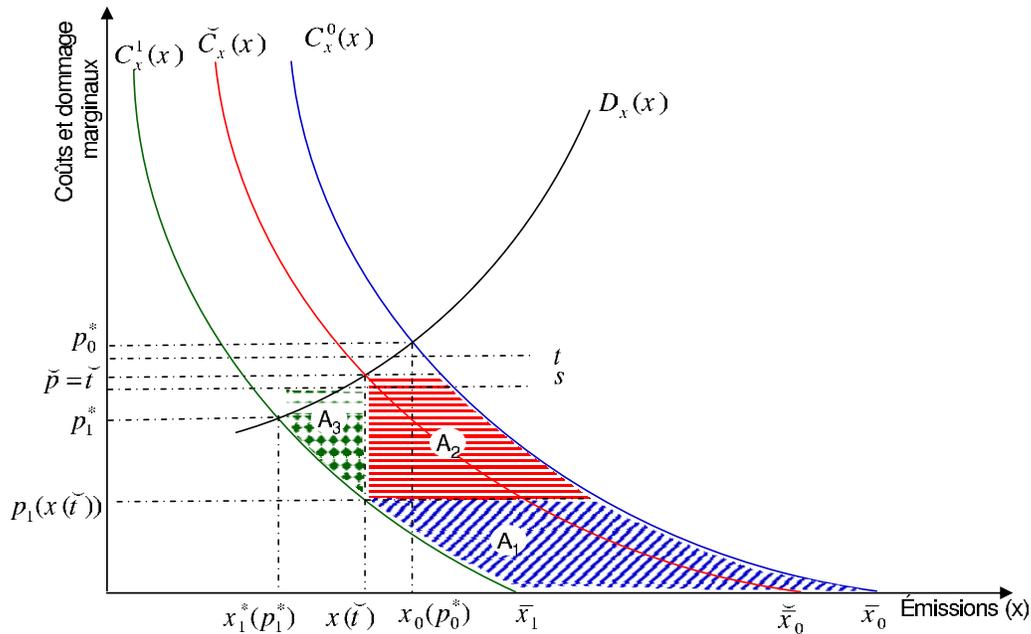


FIGURE 5.9 – Incitation à adopter la technologie propre lorsque la pollution est régulée par une combinaison permis-subsvention

#### Proposition 5.4

- i) La régulation de la pollution par un système de taxe ou de permis est plus incitative au changement technologique si le coût est parfaitement connu que s'il est surestimé.
- ii) Si la baisse du coût de dépollution marginal entraînée par l'adoption de la technologie propre emporte sur l'erreur d'estimation du coût marginal de dépollution, alors les firmes sont prêtes à dépenser plus pour acquérir la technologie propre lorsque la pollution est régulée par un système hybride que lorsqu'elle est régulée par une subvention. La régulation de la pollution par des permis engendre l'incitation au changement technologique la plus faible relativement aux autres instruments.

Toutefois, nous étudions dans la section suivante le cas où le coût de dépollution, en utilisant la technologie propre, reste supérieur au coût de dépollution malgré qu'il est sous estimé. Une taxe est envisagée pour pouvoir émettre des quantités supplémentaires de pollution.

### 5.5.2 Cas d'une technologie incrémentale

Dans cette section, le régulateur sous estime le coût de dépollution, mais cette erreur d'estimation n'est pas entièrement compensée par la baisse du coût de dépollution marginal suite à l'adoption de la technologie propre : l'exemple d'une innovation incrémentale. En outre, nous supposons que le régulateur prévoit un manque d'offre en permis et propose d'imposer une taxe  $t$  sur les unités d'émission qui ne peuvent être couvertes par l'achat de permis.

#### Taxe

Sur la figure (5.10), nous pouvons constater que le niveau d'émission optimal atteint avec la technologie propre correspond à  $x_1^*(p_1^*)$ . Or, le régulateur anticipe le coût  $\check{C}_x(x)$ , qui est une sous estimation du coût réel  $C_x^0(x)$ , puis propose la taxe  $\check{t}$  et s'attend au niveau de pollution  $x(\check{t})$ .

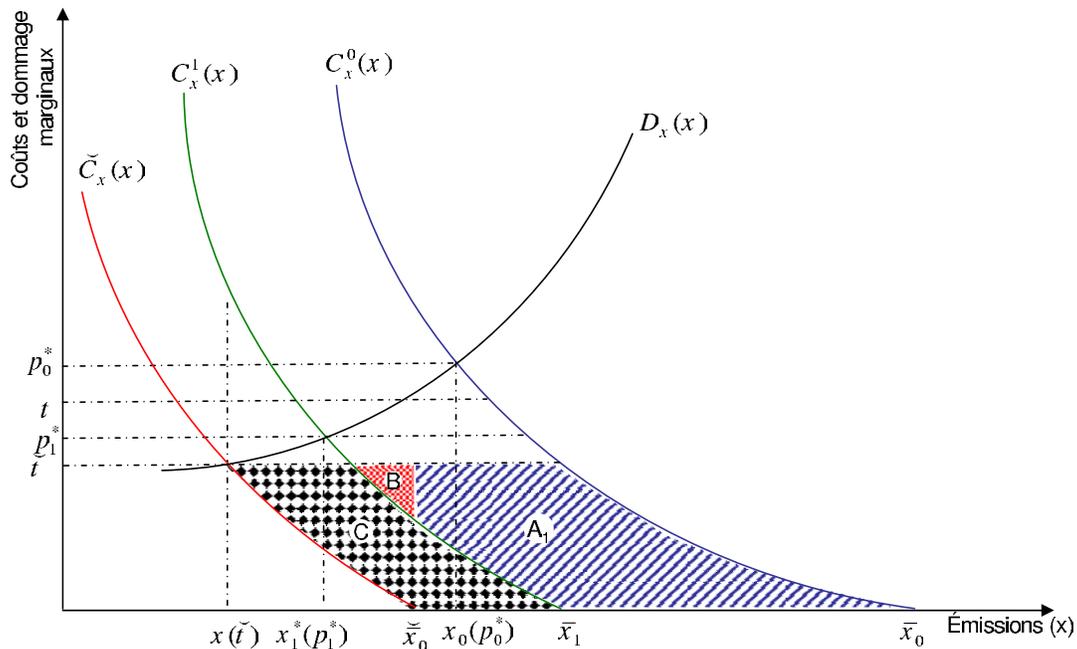


FIGURE 5.10 — Incitation à l'adoption de la technologie propre lorsque la pollution est régulée par la taxe

En adoptant la technologie propre, les firmes réalisent une économie équivalente aux aires  $A_1$  et  $B$ . À cette économie s'ajoute une autre réalisée indépendamment de la technologie utilisée et représentée par l'aire  $C$ . Celle-ci ne peut pas être attribuée au changement technologique et est donc ignorée. Ainsi, l'incitation à l'adoption de la technologie propre est équivalente à  $A_1 + B - F$ .

### Permis

Le niveau d'émission optimal atteint avec la technologie propre correspond à  $x_1^*(p_1^*)$  (figure 5.10). Or, le régulateur anticipe le coût  $\check{C}_x(x)$  qui est une sous estimation du coût réel  $C_x^0(x)$ .

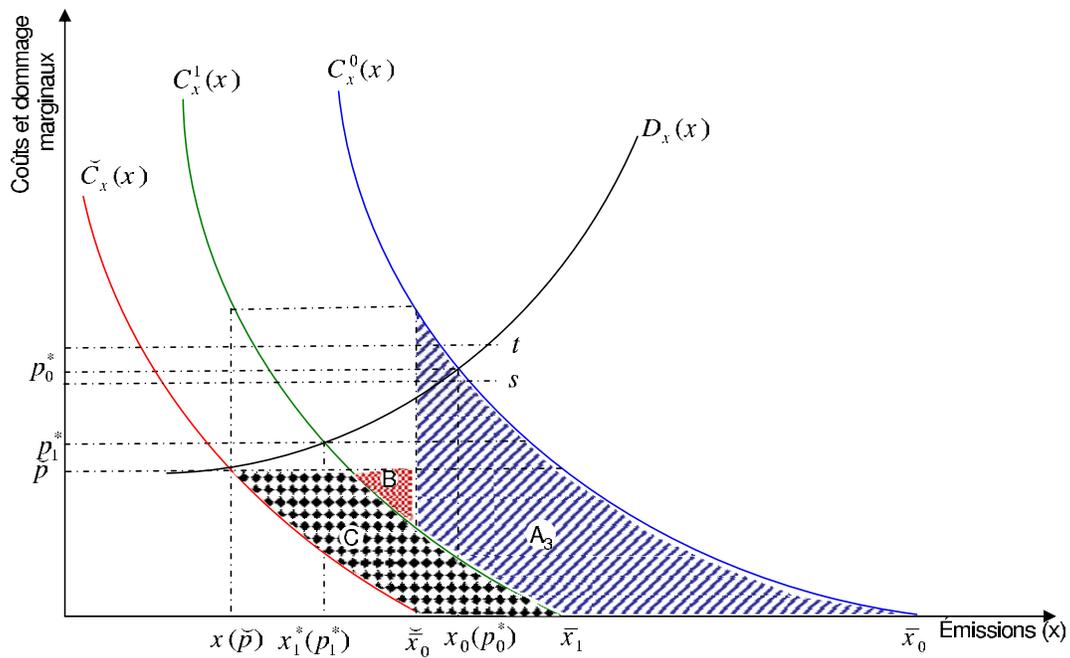


FIGURE 5.11 – Incitation à l'adoption de nouvelle technologie lorsque la pollution est régulée par les permis

Soit  $\check{p}$  le taux de la taxe qui permet d'atteindre le niveau de pollution  $x(\check{p})$  correspondant au coût estimé  $\check{C}_x(x)$  par le régulateur (figure 5.11). Cette er-

reur d'estimation a l'effet de réduire l'offre en permis à la quantité nécessaire pour couvrir  $(\check{\bar{x}}_0 - x(\check{p}))$  alors que les firmes ont besoin d'une quantité de permis équivalente à  $(\bar{x}_1 - x(\check{p}))$ . Ainsi, celles-ci augmentent leur capacité de dépollution après avoir acheté tous les permis.

En adoptant la technologie propre, les firmes réalisent une économie équivalente aux aires  $B$  et  $A_3$ . Ainsi, l'incitation à l'adoption de la technologie propre est égale à  $B + A_3 - F$ .

**Proposition 5.5**

*Lorsque le coût marginal d'abattement de dépollution estimé est inférieur au coût marginal de dépollution de la technologie propre, l'incitation au changement technologique est plus forte si la pollution est régulée par des permis que par une taxe.*

**Combinaison taxe-permis**

Dans cette sous-section, le régulateur sous estime beaucoup le coût de la firme à tel point que même avec l'adoption de la technologie, le coût marginal réel est toujours au dessus du coût estimé de dépollution. Ainsi, l'offre du régulateur en permis ne suffit que pour couvrir la quantité des émissions  $(\check{\bar{x}}_0 - x(\check{p}))$ , le reste d'émission sera couvert par une taxe  $t$  payée par la firme sur chaque unité de pollution émise, comme il est montré sur la figure 5.12.

En adoptant la technologie propre, la firme réalise une économie représentée par les aires  $A_2$  et  $B$ . Par conséquent, l'incitation à l'adoption de la technologie propre est équivalente à  $A_2 + B - F$

La comparaison de l'incitation à l'adoption de la technologie propre lorsque la pollution est régulée par la taxe, les permis ou une combinaison taxe-permis conclut que le moyen qui incite plus à la dépollution par la technologie de la firme est le plus incitatif à l'adoption de la technologie propre. Ce résultat nous amène à énoncer la proposition suivante :

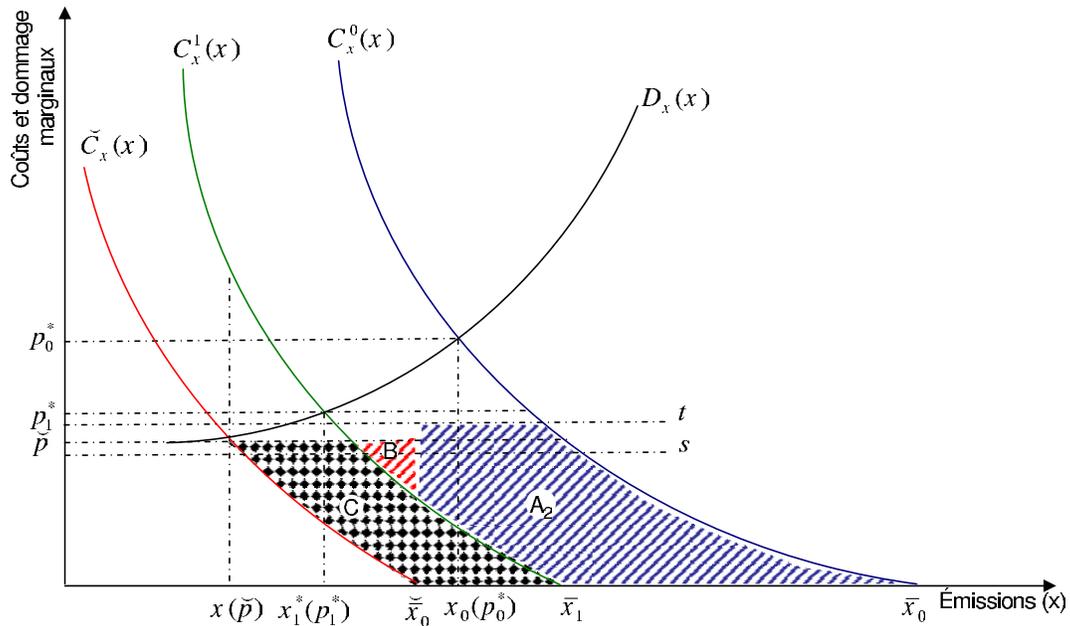


FIGURE 5.12 – Incitation à l'adoption de la technologie propre lorsque la pollution est régulée par une combinaison permis-subvention

### Proposition 5.6

Contrairement au cas étudié dans la section précédente, si l'erreur d'estimation du coût marginal de dépollution est supérieure à la baisse du coût de dépollution marginal entraînée par l'adoption de la technologie propre, alors les firmes sont prêtes à dépenser plus pour acquérir la technologie propre lorsque la pollution est régulée par des permis que lorsqu'elle est régulée par une combinaison permis-taxe. La régulation de la pollution par une taxe fournit l'incitation au changement technologique la plus faible relativement aux autres instruments.

En conclusion, nous proposons un tableau récapitulant notre contribution proprement dit dans ce chapitre :

	L'effet du changement technologique emporte sur l'erreur d'estimation	L'erreur d'estimation emporte sur l'effet du changement technologique
Système de taxe	+	+
Système de permis	++	+++
Système hybride	+++	++

FIGURE 5.13 – Incitation au changement technologique lorsque le coût de dépollution de la firme est imparfaitement connu du régulateur

## 5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié à l'aide d'une analyse graphique, l'incitation au changement technologique procurée aux firmes par différents instruments de la politique environnementale. Pour mesurer cette incitation, nous avons suivi Requate et Unold (2003) qui les définissent comme l'économie du coût de dépollution réalisée grâce à la technologie adoptée dans le but de se conformer aux exigences de la politique environnementale. D'après ces auteurs, si le régulateur est myope et connaît parfaitement les coûts de dépollution, les firmes sont plus incitées à changer de technologie si la pollution est régulée par la taxe que par les permis. Cela s'explique, en concurrence pure et parfaite, par la baisse du prix des permis au fur et à mesure que la technologie se diffuse. Dans ce cas, certaines firmes sont moins incitées à adopter des technologies propres et préfèrent acheter des permis.

En pratique, le régulateur n'est pas en mesure de connaître parfaitement les coûts. Nous avons, ainsi, testé la validité des résultats de ces auteurs en situation d'information imparfaite sur les coûts mais en retenant les autres hypothèses, notamment la myopie du régulateur. Par ailleurs, nous avons étendu l'étude de l'incitation à adopter des technologies propres pour introduire le système hybride dès lors que celui-ci est plus efficace pour réguler la pollution en situation d'incertitude sur les coûts. Ce système prend la forme d'une combinaison permis-subsidation pour les firmes dont les émissions sont inférieures à l'allocation en permis, et la forme d'une combinaison permis-taxe pour les firmes dont les émissions excèdent l'allocation en permis.

Nous avons montré que l'incitation au changement technologique est plus

forte en situation d'information parfaite qu'en situation d'incertitude sur les coûts. Dans ce dernier contexte, l'incitation dépend de la qualité de l'estimation du coût et du niveau de développement de la technologie. Ainsi, lorsque la technologie est issue d'une innovation incrémentale, le système hybride incite mieux au changement technologique que la taxe, tandis que le permis fournit la plus forte incitation par rapport aux deux autres instruments. En revanche, lorsque le régulateur surestime le coût de dépollution ou si la technologie adoptée permet de baisser radicalement le coût de telle façon qu'une erreur de sous estimation de celui-ci soit gommée, la subvention (taxe négative) fournit plus d'incitation que le permis. Néanmoins, le système hybride incite le plus au changement technologique que les permis et la subvention.

Dans ce chapitre, nous avons supposé que le régulateur est myope. Un modèle plus fin pourrait s'intéresser à l'incitation au changement technologique entraînée par les instruments de la politique environnementale lorsque le régulateur peut anticiper et réagir aux technologies adoptées par les firmes.

# Conclusion générale

Plusieurs travaux étudiant la régulation d'émission des gaz à effet de serre concluent que la pente du dommage marginal de la pollution est relativement faible par rapport à celle du coût marginal de pollution (Pizer (2002); Newell et Pizer (2003)). Par conséquent, si nous nous référons aux résultats de Weitzman (1974), nous devons soutenir l'utilisation de la taxe pour réguler ces émissions. Cependant, en pratique, il n'existe pas de réel consensus sur l'adoption de cet instrument. Pour preuve, depuis le début des années 90, l'Europe s'est engagée en faveur de la réduction des émissions du carbone en proposant une taxe sur l'émission de  $CO_2$  et la consommation d'énergie. Toutefois, n'étant pas unanimement acceptée par les pays membres de l'UE, cette taxe n'a jamais pu aboutir.

Au contraire, un marché de permis d'émission est entré en vigueur en Europe depuis 2005. Ainsi, afin de respecter les contraintes de la politique environnementale, les firmes européennes dont les émissions dépassent leur dotation initiale sont autorisées à acheter des permis auprès d'autres firmes plus performantes. Pendant la période 2005-2007, les dotations allouées ont été supérieures aux émissions, ce qui a entraîné l'effondrement du prix des permis. Pour Ellerman et Buchner (2008), cette baisse est expliquée en partie par un fonctionnement normal du système des permis qui devrait réduire la demande sur les permis. Pour d'autres, Godard (2005) et Schubert (2009) par exemple, elle est principalement le résultat d'un comportement laxiste des gouvernements européens voulant protéger leurs industriels. Pour éviter une telle situation, l'allocation en permis a été réduite pendant la période de 2008-2012. Toutefois, le prix des permis a continué à baisser car les firmes n'ont pas pu utiliser tous les permis achetés. Et pour cause, on évoque cette

fois la crise économique qui a ralenti l'activité des firmes. Dès lors, pour éviter l'effondrement des prix à partir de 2013, on suggère déjà la vente aux enchères des permis au lieu de les allouer gratuitement.

À travers ce bref historique de l'expérience de la mise en place du marché des permis, nous constatons que celui-ci fonctionne et s'améliore progressivement. Cependant, il est difficile d'échapper aux problèmes d'incertitude auxquels fait face le régulateur. Ces problèmes, qui se posent particulièrement lors de la détermination et le choix du mode d'allocation des permis, sont sources de désaccord entre pays et suscitent l'intervention des différentes parties, notamment des lobbys, réduisant davantage l'efficacité du système de permis.

En résumé, la taxe est plus privilégiée pour réguler l'émission des GES si les coûts et les dommages sont bien connus, tandis que le système des permis semble le plus acceptable en pratique. Cependant, des incertitudes persistent sur le coût et le dommage des émissions et rendent donc difficile l'anticipation de la réaction des firmes aux prix d'émission. Dans ce contexte d'incertitude, nous avons tenté d'expliquer dans cette thèse l'intérêt de l'utilisation de certains instruments de régulation de pollution.

Dans le chapitre 3, nous avons généralisé le travail de Roberts et Spence pour exposer un instrument de régulation de pollution combinant de façon appropriée la taxe et les permis. En appliquant ce système, qui joue le rôle d'une soupape de sécurité, le régulateur autorise les firmes à émettre des quantités supplémentaires de polluants en contrepartie d'une taxe si le coût de dépollution est trop élevé, et rachète la quantité non utilisée des permis par les firmes moyennant une subvention lorsque le coût est trop faible. Ce travail vient élargir celui de R&S qui considère une fonction de transfert linéaire. Nous généralisons également leur système à des fonctions de transferts non nécessairement linéaires. Ces fonctions permettent de mieux répliquer la fonction du dommage. La réplique est parfaite lorsque l'estimation du coût agrégé est parfaite. Ainsi, si son estimation est imparfaite (sous-estimation ou surestimation des coûts d'abattement), la fonction de transfert réplique

une fonction de dommage marginal calculée sur la base d'une estimation des émissions des firmes. 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'émission 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 le coût agrégé 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 le coût agrégé d'abattement du secteur, le système hybride 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 le coût agrégé est surestimé par le régulateur.

Le chapitre 4 a fait l'objet de l'étude de la régulation des émissions en présence de l'antisélection. Cette démarche est justifiée par l'asymétrie d'information à laquelle doit faire face le régulateur. Ce dernier peut être incapable de distinguer les firmes appartenant au même secteur d'activité selon leur coût de dépollution malgré le fait qu'il dispose d'une bonne connaissance des caractéristiques des technologies de dépollution utilisées par celles-ci. À l'aide d'un modèle d'antisélection, nous avons cherché à discriminer les firmes en fonction de la structure de leur fonction de coût.

Nous avons montré que le prix des permis dépend de l'élasticité de la demande de la firme. Cela s'explique par la possibilité pour les firmes de substituer l'achat des permis à une dépollution interne. Ainsi, ces prix sont négatifs pour les élasticités inférieures à l'unité et positifs pour les élasticités supérieures à l'unité. Les prix négatifs peuvent être alors interprétés comme une subvention de la dépollution par le régulateur, tandis que les prix positifs traduisent l'obligation pour les firmes d'acheter des permis pour couvrir leurs émissions.

Comme le régulateur est en situation de certitude sur le coût de dépollution agrégé, nous avons montré que, contrairement aux modèles d'an-

tisélection standards, les quantités d'émission restent les mêmes que dans l'optimum de premier rang. Ainsi, les incitations à révéler le vrai type de la firme sont véhiculées uniquement par les prix. Les contrats optimaux issus de la résolution du modèle montrent que si la dépollution est supportée par les firmes, la rente payée par les firmes moins efficaces augmente le prix des permis par rapport à la situation d'information complète. Cette rente joue dans le sens inverse et réduit la subvention destinée aux firmes moins efficaces lorsque la dépollution est subventionnée par le régulateur. Le contrat destiné aux firmes à coût faible, qui est celui du premier rang, reste inchangé.

Nous sommes conscients que la lutte contre la dépollution ne doit pas se limiter à réduire la pollution par la réduction de la production avec toutes les conséquences négatives que cela peut avoir sur la compétitivité des firmes, particulièrement dans un contexte où la question environnementale ne constitue pas une priorité pour beaucoup de pays. Ainsi, nous avons étudié dans le chapitre 5 l'incitation à adopter des technologies propres fournie par différents instruments de régulation de pollution.

En situation d'information parfaite, plusieurs travaux (Milliman et Prince (1989); Jung *et al.* (1996); Laffont et Tirole (1996)) montrent que les instruments de régulation de la pollution incitent différemment à changer de technologie. En particulier, les firmes sont plus incitées à changer leur technologie si la pollution est régulée par la taxe plutôt que par les permis (Requate et Unold, 2003; Requate, 2005). Nous avons montré à l'aide d'une analyse graphique que ces résultats sont aussi vérifiés en situation d'incertitude sur les coûts des firmes. Toutefois, la régulation de pollution entraîne une incitation au changement technologique plus faible qu'en situation d'information parfaite.

Afin de compléter notre travail, nous avons prolongé cette démarche pour traiter l'incitation au changement technologique lorsque la pollution est régulée par un instrument hybride, dès lors que celui-ci semble plus efficace en situation d'incertitude. Dans ces conditions, nous concluons que le degré d'in-

citation à changer la technologie dépend à la fois de la qualité de l'estimation du coût de dépollution par le régulateur et de l'importance de la technologie. Ainsi, lorsque le régulateur prévoit un progrès fondamental des technologies de dépollution, le risque que le régulateur fasse une erreur d'estimation du coût de dépollution est vite contrebalancé par l'effet du changement technologique. En fait, en raison de sa capacité à valoriser les émissions réduites, le système hybride permis-subsidation incite davantage au changement technologique que la taxe et permis appliqués seuls.

En revanche, si l'erreur de sous estimation du coût de dépollution est supérieure de façon que l'effet du progrès technologique sur le coût ne suffit pas pour gommer l'erreur, alors le système de permis incite à réduire le coût de dépollution plus que les autres instruments. La régulation par un système des permis procure la plus forte incitation au changement technologique, tandis que la taxe fournit l'incitation la plus faible.

Notre thèse avait pour but de mettre en évidence l'emploi de certains outils de régulation des émissions en présence d'incertitude ou d'antisélection ainsi que leur impact sur l'incitation au changement technologique. Nous avons mené des recherches basées tantôt sur des modèles théoriques tantôt sur une analyse graphique. Ces recherches peuvent être prolongées selon deux aspects. En effet, nous avons supposé dans les chapitres 3 et 5 que l'incertitude qu'a le régulateur sur le coût de dépollution est la même pour toutes les firmes. Une extension pourrait considérer que l'incertitude est une variable propre à chaque firme. Par ailleurs, dans le chapitre 4, nous nous sommes intéressés au cas où les coûts de dépollution sont parfaitement connus du régulateur. C'est le cas lorsque celui-ci est en mesure de répertorier toutes les technologies de dépollution utilisées par les firmes d'un secteur d'activité donné tout en étant incapable de distinguer les firmes par leur technologie. Un modèle plus fin pourrait s'intéresser au cas où le régulateur ne dispose que d'une estimation des coûts de dépollution.



# Annexe A

## Preuve de la proposition 2.1

Notons que  $C_l, C_u, B_l, B_u$  sont des constantes car les fonctions  $C$  et  $B$  sont supposées quadratiques par rapport à  $l$ . Il est supposé également que :

$$E[\alpha(\theta)] = E[\beta(\eta)] = 0 \quad (\text{A.1})$$

et puisque  $\theta$  et  $\eta$  sont des variables indépendamment distribuées, alors :

$$E[\alpha(\theta).\beta(\eta)] = 0 \quad (\text{A.2})$$

Notons que les fonctions stochastiques :

$$\begin{aligned} a(\theta) &\doteq C(\hat{l}, \theta) \\ b(\eta) &\doteq B(\hat{l}, \eta) \end{aligned}$$

traduisent les différentes valeurs de  $\theta$  et  $\eta$  lorsque les courbes de coût et de bénéfice se déplacent verticalement.

Nous essayons à présent de simplifier l'expression (2.30). Dérivons d'abord (2.31) et (2.32) par rapport à  $l$ . Nous trouvons :

$$C_l(l, \theta) \doteq [C_l + \alpha(\theta)] + C_u \cdot (l - \hat{l}) \quad (\text{A.3})$$

$$B_l(l, \theta) \doteq [B_l + \beta(\eta)] + B_u \cdot (l - \hat{l}) \quad (\text{A.4})$$

En remplaçant  $l$  par  $\hat{l}$  dans (A.4), on a :

$$\begin{aligned} E[C_l(\hat{l}, \theta)] &\doteq E(C_l) + E(\alpha(\theta)) \\ &\doteq C_l \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

Et en remplaçant  $l$  par  $\hat{l}$  dans (A.4), on trouve de manière analogue :

$$E[B_l(\hat{l}, \theta)] \doteq B_l \quad (\text{A.6})$$

Et en dérivant (2.31) et (2.32) par rapport à  $l$ , nous trouvons respectivement :

$$C_u(l, \theta) \doteq C_u \quad (\text{A.7})$$

$$B_u(l, \theta) \doteq B_u \quad (\text{A.8})$$

et de la CPO (2.24), nous déduisons :

$$B_l = C_l \quad (\text{A.9})$$

D'autre part, soit  $\sigma^2$  la variance de  $\alpha(\theta)$  qui représente précisément l'erreur quadratique moyenne du coût marginal. Elle s'écrit comme :

$$\sigma^2 \equiv E\left[\left(C_l(l, \theta) - E[C_l(l, \theta)]\right)^2\right] \quad (\text{A.10})$$

que l'on développe d'après (A.1) et (A.4), ce qui donne :

$$\begin{aligned} E\left[\left(C_l(l, \theta) - E\left[C_l(l, \theta)\right]\right)^2\right] &= E\left[\alpha(\theta)^2\right] + (C_u)^2 \cdot E[(\sigma_l^2)^2] \\ &= E\left[\alpha(\theta)^2\right] \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

Ainsi,

$$E\left[\left(C_l(l, \theta) - E\left[C_l(l, \theta)\right]\right)^2\right] \doteq E\left[\alpha(\theta)^2\right] \quad (\text{A.12})$$

Pareillement pour le bénéfice marginal, nous trouvons d'après (A.1) et (A.4) que :

$$E\left[\left(B_l(l, \eta) - E\left[B_l(l, \eta)\right]\right)^2\right] \doteq E\left[\beta(\eta)^2\right] \quad (\text{A.13})$$

Prenons maintenant (A.4), on a :

$$l = \frac{C_l(l, \theta) - C_l - \alpha(\theta)}{C_u} + \hat{l} \quad (\text{A.14})$$

En remplaçant  $l$  par  $h(p, \theta)$ , on déduit que :

$$h(p, \theta) = \frac{C_l(h(p, \theta), \theta) - C_l - \alpha(\theta)}{C_u} + \hat{l} \quad (\text{A.15})$$

cette égalité peut être réécrite, d'après (2.26), comme suit :

$$h(p, \theta) = \frac{p - C_l - \alpha(\theta)}{C_u} + \hat{l} \quad (\text{A.16})$$

d'où

$$h_p(p, \theta) \doteq \frac{1}{C_u} \quad (\text{A.17})$$

Comme  $h_p(p, \theta)$  est constante pour tout  $p$ , donc elle l'est aussi pour  $\check{p}$  et on a :

$$h_p(\check{p}, \theta) = \frac{1}{C_u} \quad (\text{A.18})$$

et

$$E[h_p(\check{p}, \theta)] = \frac{1}{C_u} \quad (\text{A.19})$$

D'après cette égalité et de (2.28), on trouve :

$$\check{p} \doteq E[h_1(\check{p}, \theta)] \quad (\text{A.20})$$

Revenons à (A.16), nous pouvons écrire :

$$h(\check{p}, \theta) = \frac{\check{p} - C_l - \alpha(\theta)}{C_u} + \hat{l} \quad (\text{A.21})$$

et d'après (A.4), nous avons :

$$l = \frac{B_l(l, \eta) - B_l - \beta(\eta)}{B_u} + \hat{l} \quad (\text{A.22})$$

et en remplaçant  $l$  par  $h(p, \theta)$  on écrit :

$$h(p, \theta) = \frac{B_l(h(p, \theta), \eta) - B_l - \beta(\eta)}{B_u} + \hat{l} \quad (\text{A.23})$$

d'où

$$h(\check{p}, \theta) = \frac{B_l(h(\check{p}, \theta), \eta) - B_l - \beta(\eta)}{B_u} + \hat{l} \quad (\text{A.24})$$

D'après (A.21) et de (A.24), nous avons :

$$\check{p} = B_l + \frac{B_u}{C_u}(\check{p} - C_l) \quad (\text{A.25})$$

ce qui nous permet de déduire d'après (A.9), de la condition  $B_u < 0 < C_u$  et de (A.25) que :

$$\check{p} = B_l = C_l \quad (\text{A.26})$$

et de (2.29), (A.16) et (A.26), on a

$$\begin{aligned} \check{l}(\theta) \equiv h(\check{p}, \theta) &= \frac{p - C_l - \alpha(\theta)}{C_u} + \hat{l} \\ &= \hat{l} - \frac{\alpha(\theta)}{C_u} \end{aligned} \quad (\text{A.27})$$

Maintenant, substituons alternativement  $l = \hat{l}$  et  $l = \check{l}(\theta)$  de (A.27) dans (2.31) et (2.32), nous trouvons :

$$B(\check{l}(\theta), \eta) \doteq b(\eta) + (B_l + \beta(\eta)) \left( -\frac{\alpha(\theta)}{C_u} \right) + \frac{B_u}{2} \left( -\frac{\alpha(\theta)}{C_u} \right)^2 \quad (\text{A.28})$$

$$C(\check{l}(\theta), \eta) \doteq a(\theta) + (C_l + \alpha(\theta)) \left( -\frac{\alpha(\theta)}{C_u} \right) + \frac{C_u}{2} \left( -\frac{\alpha(\theta)}{C_u} \right)^2 \quad (\text{A.29})$$

$$B(\hat{l}(\eta), \eta) \doteq b(\eta) \quad (\text{A.30})$$

$$C(\hat{l}(\eta), \eta) \doteq a(\theta) \quad (\text{A.31})$$

$$B(\check{l}(\theta), \eta) \doteq b(\eta) \quad (\text{A.32})$$

$$C(\check{l}(\theta), \eta) \doteq a(\theta) \quad (\text{A.33})$$

Ensuite, insérons les valeurs résultantes de (A.29  a A.33) dans (2.30). Ainsi, l'expression de l'avantage comparatif des prix sur les quantités peut ˆetre écrite comme :

$$\Delta \doteq \frac{\sigma^2 B_u}{2C_u^2} + \frac{\sigma^2}{2C_u} \quad (\text{A.34})$$

où  $C_u$  est la pente de la fonction de coût marginal,  $B_u$  est la pente de la fonction de bénéfice marginal et  $\sigma^2$  est la variance du coût marginal. Le signe de  $\Delta$  est celui de  $C_u + B_u$  et  $\Delta$ , dépend linéairement du carré de l'erreur moyenne du coût marginal. ♦

# Annexe B

## Preuve de la proposition 4.4

En remplaçant les équations (4.9.i) et (4.9.ii) dans (4.7) nous trouvons :

$$\frac{C'_b(l_b^*)}{C'_h(l_h^*)} = \frac{(1-\pi)}{\pi} \cdot \frac{1-|\varepsilon_b|}{1-|\varepsilon_h|} \quad (\text{B.1})$$

Avec  $1 > |\varepsilon_b| > |\varepsilon_h|$  par hypothèse, nous avons  $0 < \frac{1-|\varepsilon_b|}{1-|\varepsilon_h|} < 1$ . Considérons le scalaire  $\delta$  défini par :

$$\begin{aligned} \frac{1-(1/2-\delta)}{(1/2-\delta)} \cdot \frac{1-|\varepsilon_b|}{1-|\varepsilon_h|} &= 1 \\ \Leftrightarrow \delta &= \frac{1}{4} \cdot \frac{|\varepsilon_b| - |\varepsilon_h|}{1 - \frac{|\varepsilon_b| + |\varepsilon_h|}{2}} \end{aligned}$$

Finalement, si  $\pi \leq 1/2 - \delta$ , nous avons  $\frac{C'_b(l_b^*)}{C'_h(l_h^*)} > 1$  et  $l_b^* < l_h^*$  et si  $\pi > 1/2 - \delta$ , le signe de  $(l_b^* - l_h^*)$  est indéterminé.

Concernant les prix, nous savons de la proposition 4.2 que :

$$\frac{p_b^{FB}}{p_h^{FB}} = \frac{C'_b(l_b^*)}{C'_h(l_h^*)} \cdot \frac{1-1/|\varepsilon_h|}{1-1/|\varepsilon_b|}$$

En remplaçant (B.1) dans cette expression, nous obtenons :

$$\frac{p_b^{FB}}{p_h^{FB}} = \frac{(1-\pi)}{\pi} \cdot \frac{|\varepsilon_b|}{|\varepsilon_h|}$$

Considérons le scalaire  $\gamma$  défini par :

$$\frac{1 - (1/2 + \gamma) \cdot \frac{|\varepsilon_b|}{|\varepsilon_h|}}{(1/2 + \gamma)} = 1$$

Avec  $\frac{|\varepsilon_b|}{|\varepsilon_h|} > 1$ , nous avons  $p_b^{FB} > p_h^{FB}$  si  $\pi < 1/2 + \gamma$  et  $p_b^{FB} \leq p_h^{FB}$  si  $\pi \geq 1/2 + \gamma$ . ♦



# Bibliographie

- Z. ADAR et J.M. GRIFFIN : Uncertainty and choice in pollution control instruments. *Journal of Environmental Economics and Management*, 3 (3):178–88, 1976.
- G. AKERLOF : The market for lemons : quality uncertainty and the market mechanism. *The Quarterly Journal of Economics*, 84:488–500, 1970.
- D.P. BARON et R.B. MYERSON : Regulating a monopolist with unknown costs. *Economica*, 50(4):911–930, 1982.
- W. J. BAUMOL : On taxation and the control of the externalities. *American Economic Review*, 62(3):307–322, 1972.
- W.J. BAUMOL et W.E. OATES : *The Theory of Environmental Policy*. Cambridge University Press, 2nd edition édition, 1988.
- F. BEL, G.A. DROUET, A. LACROIX et A. MOLLARD : Efficacité et limites d’une taxe sur les engrais azotés : éléments d’analyse à partir de seize pays européens. *Économie et Prévision*, (166):99–113, 2004.
- V. BOISVERT, A. CARON et E. RODARY : Privatiser pour conserver ? une lecture critique de la nouvelle économie des ressources. *revue Problèmes économiques*, (2863):9–14, 2004.
- P. BONTEMS et G. ROTILLON : *L’économie de l’environnement*. Découverte, Paris, 2007.
- J.B. BRADEN et K. SEGERSON : *Information problems in the design of nonpoint-source pollution policy*, pages 1–36. Nonpoint Source Pollution

- Regulation : Issues and Analysis. Kluwer Academic Publishing, Boston, MA, 1993.
- F. BULCKAEN : Emissions charge and asymmetric information : Consistently a problem? *Journal of Environmental Economics and Management*, 34: 100–106, 1997.
- R. H. COASE : The problem of social cost. *Journal of Law and Economics*, 3:1–44, 1960.
- F. COCHARD, R. BARBIER et A. ROZAN : Taxe ambiante : un outil adapté à la lutte contre les coulées de boue ? une étude expérimentale, mai 2007.
- F. COCHARD, M. WILLINGER et A. P. XEPAPADEAS : Efficiency of nonpoint source pollution instruments : An experimental study. *Environmental and Resource Economics*, 30(4):393–422, 2005.
- B. COURNEDE et S. GASTALDO : Combinaison des instruments prix et quantités dans le cas de l'effet de serre. *Économie et Prévision*, 5(156):51–62, 2002.
- M. CROPPER et W.E. OATES : Environmental economics : A survey. *Journal of Economic Literature*, 30:675–740, 1992.
- P. CROSEMARIE : Fiscalité écologique et financement des politiques environnementales. *Journal Officiel. Avis et rapports du Conseil Économique et Social (FRA)*., (29):IV–77, 2009.
- J. H. DALES : *Pollution, Property and Prices*. University of Toronto Press, Toronto, 1968.
- M. DAMIAN et J.C. GRAZ : *Commerce international et développement soutenable*. Economica, Paris, 2001.
- P. B. DOWNING et L. J. WHITE : Innovation in pollution control. *Journal of Environmental Economics and Management*, 13:18–29, 1986.
- M.E. EISWERTH : *Regulatory/Economic Instruments for Agricultural Pollution : Accounting for Input Substitution*, pages 69–90. Kluwer Academic Publishing, Boston, 1993.

- P. EKINS et S. SPECK : Competitiveness and exemptions from environmental taxes in europe. *Environmental and Resource Economics*, 13:369–396, 1999.
- A. D. ELLERMAN et B. K. BUCHNER : Over-allocation or abatement? a preliminary analysis of the eu ets based on the 2005-06 emissions data. *Environmental and Resource Economics*, (41):267–287, 2008.
- EUROBAROMETER : Europeans' attitudes towards climate change, November 2009. European Commission and European Parliament.
- Communauté EUROPÉENNE : Directive 2003/87/CE du parlement européen et du conseil établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre au sein de la communauté européenne. *Journal Officiel de l'Union européenne*, octobre 2003.
- C. FISCHER, I.W.H. PARRY et W.A. PIZER : Instrument choice for environmental protection when technological innovation is endogenous. *Journal of Environmental Economics and Management*, (45):523–545, 2003.
- X. FREIXAS : Une analyse coût-avantage des mécanismes d'allocation : l'approche prix-quantités. *Revue Économique*, 32(6):1074–1086, 1981a.
- X. FREIXAS : Comparaison de mécanismes d'allocation. *Revue Économique*, 32(5):870–886, 1981b.
- R. A. FROSCHE et N. E. GALLOPOULOS : Strategies for manufacturing. *Scientific American*, 261(3):144–152, 1989.
- S. GASTALDO : Comment lutter contre l'effet de serre? un panorama des outils économiques. *Regards croisés sur l'économie*, (6):104–113, 2009.
- O. GODARD : L'expérience américaine des permis négociables. *Economie Internationale, la revue du Cepii*, (82), 2000.
- O. GODARD : Politique de l'effet de serre - une évaluation du plan français de quotas de co2. *Revue française d'économie*, (4), 2005.

- R. GRIFFIN et D. BROMLEY : Agricultural runoff as a nonpoint externality : A theoretical development. *American Journal of Agricultural Economics*, 64:547–572, 1982.
- G. GROSSMAN et A.B. KRUEGER : Economic growth and the environment. *Quarterly Journal of Economics*, 110(2):353–377, 1995.
- E. HAUVUY et N. RIEDINGER : Une estimation du coût d’abattement de la pollution atmosphérique pour les entreprises françaises. *Économie et Prévision*, (168):63–75, 2005.
- P. HELLEGERS et E.V. IERLAND : Exogeneous targeting instruments as a solution to group moral hazards. *Environmental and Resource Economics*, 26:163–172, 2003.
- J.A. HERRIGES : Budget-balancing incentives mechanisms. *Journal of Environmental Economics and Management*, 27:275–85, 1994.
- J.B. JAFFE, R.G. NEWELL et R.N. STAVINS : Environmental policy and technological change. *Environmental and Resource Economics*, 22:41–70, 2002.
- Ch. JUNG, K. KRUTILLA et R. BOYD : Pollution abatement technology at the industry level : an evaluation of policy alternatives. *Journal of Environmental Economics and Management*, (30):95–111, 1996.
- M.I. KAMIEN, N.L. SCHWARTZ et F.T. DOLBEAR : Asymmetry between bribes and charges. *Water Resources Research*, 2(1):147–157, 1966.
- L. KAPLOW et S. M. SHAVELL : On the superiority of corrective taxes to quantity regulation. *American Law and Economics Review*, 4(1):1–17, 2002.
- H. KEMPF et C. HENOCQ : Agrégation quasi parfaite par convergence. *Revue Économique*, 35(5):911–928, 1984.
- C.D. KOLSTAD : *Environmental Economics*. Oxford University Press, Oxford, 2000.

- J. J. LAFFONT et J. TIROLE : Pollution permits and compliance strategies. *Journal of Public Economics*, 62(1-2):85–125, 1996.
- J. J. LAFFONT et J.A. TIROLE : Adverse selection and renegotiation in procurement. *Review of Economic Studies*, 57:597–625, 1990.
- D. LARSON, G. HELFAND et B. HOUSE : Second-best tax policies to reduce nonpoint source pollution. *American journal of agricultural economics*, (78):1108–1117, 1996.
- M. LOEB et W. A. MAGAT : A decentralized method for utility regulation. *Journal of Law and Economics*, 22:399–404, 1979.
- P. MAHENC : Persuasive subsidies in a clean environment. *Working Paper n° 08.02.246, LERNA, University of Toulouse*, 2008.
- J. MARSCHAK et K. MIYASAWA : Economic comparability of information systems. *International Economic Review*, juin 1968.
- J. MARSCHAK et R. RADNER : The economic theory of teams. 1971.
- W. J. MCKIBBIN et P. J. WILCOXEN : A better way to slow global climate change. *Brooking Policy Brief*, (17), 1997.
- S.R. MILLIMAN et R. PRINCE : Firm incentives to promote technological change in pollution control. *Journal of Environmental Economics and Management*, 17:247–265, 1989.
- W. D. MONTGOMERY : Markets in licences and efficient pollution control programs. *Journal Of Economic Theory*, 5(3):395–418, 1972.
- M. MOUGEOT et S. SCHWARTZ : Allocation optimale de quotas de pollution et information asymétrique. *Revue Économique*, 59(3):505–516, 2008.
- R. NEWELL et W. PIZER : Regulating stock externalities under uncertainty. *Journal of Environmental Economics and Management*, 45:416–432, 2003.
- W. D. NORDHAUS : *Managing the Global Commons*. MIT Press, Cambridge, 1994.

- C. PHILIBERT : Prix versus quantités taxes ou permis contre le changement climatique. *Revue d'économie politique*, 113:439–453, 2003.
- A.C. PIGOU : *The Economics of Welfare*. Macmillan, London, 1920.
- W. PIZER : The optimal choice of climate change policy in the presence of uncertainty. *Resource and Energy Economics*, 21:255–287, 1999.
- W. PIZER : Combining price and quantity controls to mitigate global climate change. *Journal of Public Economics*, 85:409–434, 2002.
- A. M. POLINSKY : Notes on the symmetry of taxes and subsidies in pollution control. *Canadian Journal of Economics*, 12(1):75–83, 1979.
- T. REQUATE : Dynamic incentives by environmental policy instruments—a survey. *Ecological Economics*, 54:175–195, 2005.
- T. REQUATE et W. UNOLD : Environmental policy incentives to adopt advanced abatement technology : Will the true ranking please stand up. *European Economic Review*, 47:125–146, 2003.
- M. ROBERTS et M. SPENCE : Effluent charges and licenses under uncertainty. *Journal of Public Economics*, 5:193–208, 1976.
- M. ROTHSCHILD et J. STIGLITZ : Equilibrium in competitive insurance markets. *Quarterly Journal of Economics*, 90:629–649, 1976.
- G. ROTILLON : *Gestion optimale des ressources épuisables avec ou sans renouvellement*. Thèse de doctorat, Université de Paris I-Panthéon-Sorbonne, 1981.
- C. S. RUSSELL : A note on the efficiency ranking of two second-best policy instruments for pollution control. *Journal of Environmental Economics and Management*, 13(1):13–17, 1986.
- B. SALANIÉ : *Théorie des contrats*. Economica, Paris, 1994.
- P. A. SAMUELSON : The pure theory of public expenditure. *The Review of Economics and Statistics*, 36(4):387–389, 1954.

- K. SCHUBERT : *Pour la taxe carbone. La politique économique face à la menace climatique*. Numéro 18. Éditions rue d'Ulm, Presses de l'École Normale Supérieure, 2009.
- K. SEGERSON : Uncertainty and incentives for nonpoint pollution control. *Journal of Environmental Economics and Management*, 15:87–98, 1988.
- S. A. SHAH : Optimal management of durable pollution. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 29:1121–1164, 2005.
- J. SHORTLE et J. DUNN : The relative efficiency of agricultural source water pollution control policies. *American Journal Of Agricultural Economics*, pages 668–677, 1986.
- J.S. SHORTLE et D.G. ABLER : *Incentives for Nonpoint Pollution Control*, pages 137–49. Kluwer Academic, Dordrecht, 1994.
- J.S. SHORTLE et R. D. HORAN : The economics of nonpoint pollution control. *Journal of Economic Surveys*, 15(3):255–289, 2001.
- S. SPAETER et A. VERCHÈRE : Aléa moral et politiques d'audit optimales dans le cadre de la pollution d'origine agricole de l'eau. *Cahiers d'économie et sociologie rurales*, (71):5–35, 2004.
- D. SPULBER : Effluent regulation and long run optimality. *Journal of Environmental Economics And Management*, 12:103–116, 1985.
- R. N. STAVINS : Transaction costs and tradable permits. *Journal of Environmental Economics and Management*, 29(2):133–148, 1995.
- R.N. STAVINS : Experience with market-based environmental policy instruments. *in Handbook of Environmental Economics*, 1:355–435, 2003.
- J. STEWART : the welfare implications of moral hazard and adverse selection in competitive insurance markets. *Economic Inquiry*, 32:193–208, 1994.
- G. J. STIGLER : *The theory of prices*. Macmillan, New York, 1966.
- H. THEIL : Principles of econometrics. 1971.

- T. H. TIETENBERG : émissions trading : An exercise in reforming pollution policy. *Resources for the Future*, 1985.
- T. H. TIETENBERG : Tradeable permits for pollution control when emission location matters : What have we learned? *Environmental and Resource Economics*, 5:95–113, 1995.
- H. R. VARIAN : *Microeconomic Analysis*. Norton, 1992.
- A. VERCHÈRE : Lutter contre la pollution diffuse de l'eau d'origine agricole en Alsace. Rapport de recherche, BETA-Université de Louis Pasteur, Strasbourg, Janvier 2004.
- R.T. WATSON et C. W. TEAM : Bilan 2001 des changements climatiques. Rapport de synthèse, Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), USA, 2001.
- M.L. WEITZMAN : Prices vs. quantities. *Review of Economic Studies*, 41:477–491, 1974.
- M.L. WEITZMAN : Optimal rewards for economic regulation. *American Economic Review*, 68:683–691, 1978.
- C. WILSON : A model of insurance market with incomplete information. *Journal of Economic Theory*, pages 167–207, 1977.
- A. P. XEPAPADEAS : Environmental policy under imperfect information : Incentives and moral hazard. *Journal of Environmental Economics and Management*, 20:113–126, 1991.
- A. P. XEPAPADEAS : Environmental policy design and dynamic nonpoint-source pollution. *Journal of Environmental Economics and Management*, 23:22–39, 1992.
- A. P. XEPAPADEAS : Observability and choice of instrument mix in the control of externalities. *Journal of Public Economics*, 56:485–98, 1995.
- A. P. XEPAPADEAS : *Non-Point Source Pollution Control*, pages 539–50. Edward Elgar Publishing, Northampton, 1999.