

Université de Montréal

Impact de l'apprentissage par expérience sur l'efficacité des permis d'émission échangeables comme outil de régulation de la pollution : aspect expérimental

Par  
Marjolaine Gauthier-Loiselle

Département de sciences économiques  
Faculté des arts et sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures en vue de l'obtention du grade de maîtrise en sciences économiques

Août 2006

©Marjolaine Gauthier-Loiselle, 2006



HB

38

U54

2006

v.005



## AVIS

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

## NOTICE

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal  
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :

Impact de l'apprentissage par expérience sur l'efficacité des permis d'émission échangeables comme outil de régulation de la pollution : aspect expérimental

présenté par :  
Marjolaine Gauthier-Loiselle

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Gérard Gaudet  
président-rapporteur

Olivier Armantier  
directeur de recherche

Claude Montmarquette  
membre du jury

## Résumé

L'objectif de ce mémoire est de déterminer les impacts de l'apprentissage par expérience sur la désirabilité des permis d'émission échangeables (PÉE). Nous avons comparé cette méthode de régulation à celle de la norme (CC) selon trois critères d'évaluation, soit le niveau de profits des firmes, les investissements en technologie propre et la structure du marché. Pour ce faire, nous avons d'abord fait une simulation numérique. Nous avons ensuite réalisé une expérience au cours de laquelle les sujets peuvent produire avec une technologie propre ou détenir des permis d'émission et produire avec une technologie polluante. Le prix de la technologie propre est défini de sorte à intégrer l'apprentissage par expérience et les firmes se distinguent selon leur niveau d'expérience initial. Un résultat important se dégageant de l'expérience est que les sujets ne sont pas parvenus à extraire tous les gains possibles de l'échange des permis d'émission. En conséquence, le niveau de profits atteint avec les PÉE est inférieur à celui avec CC. Par ailleurs, les analyses numériques et expérimentales ne permettent pas la détermination d'un instrument à privilégier sous les trois critères. Ainsi, l'importance relative de chacun des critères déterminera quel instrument le régulateur devrait choisir.

Mots clés :

Permis d'émission, apprentissage par expérience, technologie propre, économie expérimentale.

### Abstract

This research was conducted in order to find the impacts of learning-by-doing (LBD) on the attractiveness of tradable emission permits. We use command-and-control (CC) as an alternative and evaluate both regulation instruments on the criteria of profits achieved, investments in clean technology and market structure. We first ran a numerical analysis, and then we proceeded with experimentation. Subjects must choose to produce with a clean technology or a pollutant technology and emission permits. Clean technology price is defined to take LBD in account and initial level of experience differ from one firm to the other, so do their initial costs of clean technology. One of the most important results is that subject were not able to extract all possible gains of trade in emission permit market. As a consequence, emission permits lead to less total profits than CC. Also, both the numerical and experimental analysis do not give a clear conclusion about which instrument must be used. Each evaluation criteria favors a different regulation method.

Key words: Emission permit, learning-by-doing, technology, experimental economics.

## Table des matières

Résumé	iii
Abstract	iv
Liste des tableaux	vi
Liste des figures	vii
Liste des abréviations	viii
Remerciements	ix
1. Introduction	1
2. Quelques informations pertinentes	4
3. Revue de la littérature	7
3.1. Aspect théorique	7
3.2. Aspect expérimental	9
4. Analyse théorique	13
4.1. Modèles utilisés	13
4.2. Résultats simulés	17
4.3. Principales conclusions de l'analyse théorique	25
5. Design expérimental	28
6. Analyse des résultats expérimentaux	31
6.1. Efficacité	31
6.2. Quantités choisies	34
6.3. Vente aux enchères	41
7. Conclusion	44
Bibliographie	48
Annexes	x
Annexe I- Instructions	x
Annexe II- Questionnaire (compréhension)	xv

## Liste des tableaux

Tableau 1	20
Résultats simulés avec coût initial faible de la technologie propre	
Tableau 2	22
Résultats simulés avec coût initial moyen de la technologie propre	
Tableau 3	23
Résultats simulés avec coût initial élevé de la technologie	
Tableau 4	32
Efficacité selon les traitements	
Tableau 5	35
Quantités moyennes choisies dans le traitement 1	
Tableau 6	36
Quantités moyennes choisies dans le traitement 2	
Tableau 7	37
Quantités moyennes choisies dans le traitement 3	
Tableau 8	41
Instrument de régulation à privilégier selon le critère	



## Liste des figures

Graphique 1	33
Niveau d'efficacité moyen selon les traitements	
Graphique 2	39
Quantités totales produites et de technologie utilisée en moyenne selon le traitement	
Graphique 3	39
Quantités totales produites en moyenne par un sujet selon le traitement et sa catégorie	
Graphique 4	40
Fréquence des quantités d'équilibre selon la catégorie	
Graphique 5	42
Prix moyen des permis d'émission selon le traitement et la période	

## Liste des abréviations

CAAA : Clean Air Act Amendment

CC : Norme («command-and-control»)

PÉE : Permis d'émission échangeables

## Remerciements

Je tiens à remercier le Conseil de recherche en sciences humaines (CRSH) pour sa contribution monétaire. Sans cette subvention, la réalisation de ce mémoire n'aurait pu être réalisée. De même, je souhaite remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire. En particulier Julie Héroux pour la programmation et la réalisation de l'expérience, ainsi que Julien Picault pour l'assistance lors des sessions expérimentales. Par ailleurs, je voudrais remercier mon directeur de recherche, Olivier Armantier, pour ses précieux conseils jusqu'à la dernière minute.

## 1. Introduction

En ratifiant le Protocole de Kyoto, le Canada s'est engagé à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 6% sous son niveau de 1990 pour la période de 2008 à 2012 (Nations Unies 1998). Afin de respecter cet engagement, le Canada doit envisager divers instruments pour réguler ses émissions. Essentiellement, deux types de mécanismes sont proposés : ceux basés sur des normes et ceux basés sur les mécanismes de marchés. Parmi le second type, on retrouve principalement les taxes sur les émissions et les permis d'émission échangeables (ci-après PÉÉ). Dans la théorie économique, de nombreuses études comparent la régulation par les normes (« command-and-control », ci-après CC) aux différents mécanismes de marchés. Ces études montrent que la régulation basée sur des mécanismes de marché permet d'atteindre la réduction des émissions à un coût social inférieur par rapport à CC. Les économistes favorisent donc généralement le second type d'instruments de régulation. Cependant, ces études se basent habituellement sur l'efficacité comme seul critère d'évaluation. On peut se demander s'il n'y a pas d'autres critères à tenir compte dans le choix d'un instrument de régulation des émissions. De plus, ces études se basent en général sur des modèles assez simples. On peut se demander si on obtient les mêmes résultats avec des modèles plus sophistiqués.

Tout d'abord, du point de vue d'un régulateur social, les coûts de la réduction des émissions doivent être le plus bas possible. Cette notion de minimisation des coûts de réduction est ce qu'on appelle « efficacité ». Cependant, d'autres critères doivent être considérés pour choisir le meilleur instrument de régulation. Entre autres, les incitatifs à investir dans la technologie propre selon chacune des alternatives peut se révéler important si l'on veut que, à terme, la production soit faite avec le plus bas niveau de pollution possible. De plus, on doit surveiller la variation du niveau de production de chacune des firmes suite à la régulation si on ne veut pas trop modifier la structure du marché. En effet, certaines firmes pourraient se retrouver avantagées par rapport aux autres et occuper une plus grande part de marché après la régulation. Ainsi, pour notre étude, nous baserons notre évaluation

sur trois critères, soit le coût de réduction des émissions, les incitatifs à l'investissement dans la technologie propre et les effets sur la structure du marché.

Par ailleurs, les modèles classiques assument généralement que les coûts de la technologie propre demeurent fixes dans le temps. Or, l'apprentissage par expérience (« learning-by-doing ») peut réduire significativement les coûts d'utilisation d'une technologie, particulièrement lorsque celle-ci est récente. Pour notre part, nous incluons cette notion d'apprentissage par expérience dans notre modèle. De plus, la majorité des modèles classiques assument la symétrie entre les firmes. Pour notre part, nous introduirons une asymétrie entre les firmes au niveau du coût à utiliser la technologie propre, dépendamment des caractéristiques structurelles de la firme.

Plus précisément, il s'agit de vérifier si l'introduction de l'apprentissage par expérience et l'asymétrie dans les coûts de réduction des émissions peut nuire à la désirabilité des instruments de régulation basés sur des mécanismes de marché. Nous nous pencherons sur les PÉÉ plutôt que les taxes sur les émissions, puisqu'ils se trouvent au cœur du Protocole de Kyoto. Nous comparerons donc les performances des PÉÉ avec celles de CC comme instrument de régulation sous les trois critères énumérés précédemment : efficacité, investissement dans la technologie propre et structure du marché.

Pour ce faire, dans un premier temps, nous simulerons les résultats pour différents paramètres. Ceci nous permettra de tirer des conclusions générales et un portrait de l'intuition économique expliquant les résultats. Par la suite, nous réaliserons une expérience en laboratoire pour vérifier si ces résultats théoriques concordent bien avec la pratique. En effet, il se pourrait que les individus surestiment ou sous-estiment les gains de l'apprentissage par expérience, ce qui les amènerait à prendre de mauvaises décisions. D'autre part, contrairement à CC, les PÉÉ pourrait entraîner de la spéculation en pratique, ce qui pourrait affecter ses propriétés théoriques. Il est donc primordial de s'assurer que les résultats obtenus par simulation s'approchent de ceux obtenus avec des individus. Ainsi, au cours de l'expérience, les participants seront amenés à effectuer des choix en matière de technologie propre et de permis d'émission pour le compte d'une firme (fictive) qu'ils représentent. Cette expérience se distingue de celles qui l'ont précédée par la prise en compte de l'apprentissage par expérience, l'introduction d'une asymétrie entre les firmes, ainsi que la possibilité de choisir explicitement un niveau de

technologie propre. Suite à cela, nous pourrions faire des suggestions en matière de méthode de régulation de la pollution selon que l'objectif poursuivi soit la minimisation des coûts, la compétitivité du marché ou l'investissement dans des technologies plus propres.

Le texte qui suit sera divisé en 6 sections. Tout d'abord, la première section donne des informations supplémentaires sur la régulation environnementale. La deuxième section fait un survol de la littérature sur le sujet. La troisième section consiste en l'analyse théorique, incluant la présentation des résultats simulés. La section suivante détaille le design expérimental. La cinquième section présente l'analyse des résultats expérimentaux. Enfin la sixième section apporte la conclusion.

## 2. Quelques informations pertinentes

Depuis les années 1960, la conscientisation populaire face à la dégradation de l'environnement a poussé les autorités gouvernementales à imposer des règles strictes quant aux émissions de polluants. À la base, la régulation se faisait surtout par des normes. Cette méthode de régulation consiste à donner le droit d'émettre une certaine quantité de polluant et, passé cette limite, imposer une pénalité au contrevenant. Il faut par ailleurs un système de vérification et des pénalités suffisamment sévères afin d'assurer le respect de la norme. Il s'agit en quelque sorte de permis d'émission, mais qui ne sont pas échangeables. Voyons maintenant plus en détail ce à quoi réfèrent les permis d'émission échangeables.

### *Concept de PÉÉ*

Les PÉÉ ont été proposés pour la première fois par Dales (1968). Le concept est assez simple. D'abord, le régulateur doit choisir un objectif en termes de quantité globale d'émission d'un polluant à atteindre. Il doit ensuite mettre en circulation la quantité de permis d'émission nécessaire à l'atteinte de l'objectif. Enfin, il doit instaurer une loi qui interdit aux firmes d'émettre le polluant concerné sans détenir les permis adéquats et associer des pénalités en cas de non-respect. Les firmes peuvent ensuite s'échanger les permis d'émission dans le cadre prévu par le régulateur. Il faut cependant faire attention à cette méthode de régulation, car, telle que décrite, elle n'est viable que pour certains types de polluants.

Plus particulièrement, cela s'applique bien aux cas de polluants uniformes, soit des polluants qui se dispersent rapidement de sorte que leur concentration, et donc leurs effets sur l'environnement, restent similaires peu importe l'endroit. Si les polluants ne possèdent pas cette particularité, les permis ne devraient plus être en termes d'émissions de polluants, mais plutôt en termes de détérioration de l'environnement en un lieu précis. Sans cette modification, certaines régions pourraient se retrouver gravement polluées, faisant ainsi échouer l'objectif d'un environnement sain. Toutefois, cette variante a l'inconvénient d'alourdir l'administration du programme, ce qui en diminue l'attrait. Pour notre part, nous

pouvons nous limiter aux permis allouant une quantité d'émissions précise puisque la majorité des gaz à effet de serre polluants cibles du Protocole de Kyoto, diffusent uniformément. Ainsi, les PÉÉ demeurent un instrument de régulation intéressant dans ce cadre.

### *PÉÉ en théorie et en pratique*

Bien que le concept de PÉÉ ait vu le jour en 1968, il a fallu attendre Montgomery (1972) pour le développement des propriétés théoriques. Les résultats principaux sont que, sous certaines hypothèses dont la compétition parfaite, l'équilibre d'un marché de permis d'émission existe et concorde avec la minimisation des coûts de réduction de la pollution. De plus, en faisant l'hypothèse supplémentaire de coûts de transaction nuls, la méthode d'allocation initiale des permis n'a aucun effet sur la répartition finale. De plus, pour arriver à cela, aucune information autre que la quantité d'émission souhaitée n'est nécessaire. Ainsi, les PÉÉ constituent un moyen de régulation des plus intéressants, puisque avec très peu d'information, on atteint la situation efficace.

Il n'est donc pas surprenant que l'on retrouve quelques marchés de PÉÉ un peu partout dans le monde. Le plus important de ces marchés concerne l'émission de  $\text{SO}_2$  et a été instauré aux États-Unis dans le cadre du « Clean Air Act Amendments (CAAA) » de 1990. Dans ce marché, les permis d'émission sont distribués gratuitement à chaque année, mais les firmes doivent remettre une certaine part des permis reçus dans une vente aux enchères qui a lieu une fois l'an.

Par ailleurs, en attendant que la création prévue en 2008 d'un marché international de permis d'émission de  $\text{CO}_2$ , certains pays ont instauré des bourses de carbone. Citons notamment le « Chicago Climate Exchange » qui est un système d'échange de droits d'émission volontaire pour les 6 gaz à effets de serres en place depuis 2003. Il y a plus de 120 membres, dont des entreprises, des villes et des états, des institutions académiques, des fermiers, etc. Plus formellement, le « European Climate Exchange » a commencé son marché de droits d'émission de  $\text{CO}_2$  en janvier 2005. Il s'y transige plus de 2 millions de tonnes de  $\text{CO}_2$  par plus de 10 000 entités. Ici, il y a une limite d'émission fixée par les autorités gouvernementales pour chaque firme. À la fin de l'année, les firmes ayant émis au-delà de leur limite doivent acheter



des crédits aux firmes qui ont émis en-deçà de leur limite. Si les firmes ne se conforment pas, elles doivent payer une pénalité au gouvernement pour chaque tonne excédent la limite permise. Par ailleurs, la bourse de Montréal s'est associée au « Chicago Climate Exchange » pour être éventuellement prêt à transiger des droits de CO<sub>2</sub>. Elle doit cependant attendre la coopération du gouvernement fédéral qui tarde à venir. Ce marché fera interagir 700 entreprises qui émettent près de la moitié des émissions de CO<sub>2</sub> au Canada. Ces entreprises œuvrent principalement dans les secteurs pétroliers, manufacturiers, miniers et dans la production d'électricité. En général, même si les caractéristiques des marchés de permis d'émission varient d'un endroit à l'autre, la création de tel marché prend de plus en plus d'ampleur au niveau mondial. Voyons maintenant plus en détail en quoi consistent les permis d'émission.

#### *Autres méthodes de régulation de la pollution*

Outre les permis d'émission échangeables et les normes, les taxes sur les émissions constituent une autre alternative sérieusement envisagée. Tout comme les PÉÉ, les taxes sur les émissions (ou taxes pigouviennes) permettent aussi la réduction des émissions au coût minimum. Cependant, pour atteindre le niveau d'émission souhaité, le gouvernement doit connaître les coûts de réduction des firmes. Lorsque cette information demeure inconnue ou incertaine, la taxe peut mener à un niveau inférieur ou supérieur d'émission. En revanche, dans le cas des PÉÉ, l'incertitude ne se reflète pas dans les quantités d'émission, puisqu'elles sont fixées à l'avance, mais bien dans les prix d'échange des permis qui différeront des prix prévus théoriquement. De ce fait, dans le cadre du protocole de Kyoto, les PÉÉ ont un net avantage sur la taxe, puisque que les objectifs sont exprimés en terme de quantités. C'est pourquoi nous laisserons de côté la taxe sur les émissions en guise de méthode de régulation alternative. Voyons maintenant ce qui s'est écrit antérieurement à propos de notre sujet.

### 3. Revue de la littérature

Dans cette section, nous vous présenterons ce qui a été développé au sujet des permis d'émission en présence d'apprentissage par expérience. Nous exposerons les articles théoriques dans un premier temps, puis les articles expérimentaux. Notons que les articles théoriques choisis incluent la notion d'apprentissage par expérience, mais que ce n'est pas le cas pour les articles expérimentaux, puisque, à notre connaissance, l'apprentissage par expérience n'a pas encore été intégré dans cette littérature. Nous vous présenterons donc des articles expérimentaux qui ont reproduit en laboratoire des marchés de permission, mais sans apprentissage par expérience.

#### 3.1. Aspect théorique

Mentionnons d'abord que la notion d'apprentissage par expérience en économie est assez récente. En effet, elle a principalement été développée par Arrow (1962). Ce dernier a suggéré que l'expérience dans l'utilisation d'une technologie augmente la productivité des travailleurs, ainsi que celle de tous les autres intrants. De ce fait, les coûts de production tendent à réduire avec l'utilisation passée de cette technologie. On retrouve plusieurs articles empiriques qui étudient le phénomène d'apprentissage par expérience au sein des firmes.<sup>1</sup> Ces études montrent qu'il y a, en général, bel et bien apprentissage par expérience dans l'utilisation de technologie. De plus, généralement, cet apprentissage est marginalement décroissant. Autrement dit, la réduction des coûts de production diminue au fur et à mesure que le niveau d'expérience augmente. Nous choisirons les paramètres de l'expérimentation en laboratoire de sorte à refléter cette caractéristique de l'apprentissage par expérience. Voyons maintenant ce qu'implique l'apprentissage par expérience pour la réduction des émissions d'un point de vue théorique.

*Goulder et Mathai (2000)*

---

<sup>1</sup> Voir Argote et Epple (1990) et McDonald et Schramm (2001) pour une revue des études empiriques de ce phénomène.

Cette étude dérive les impacts du changement technologique endogène, incluant l'apprentissage par expérience, sur la réduction optimale du CO<sub>2</sub> et sur la taxe à utiliser pour la régulation. Ils ont utilisé deux types de changement technologique endogène, soit l'apprentissage par expérience, ainsi que la recherche et développement. Ils ont également utilisé deux critères d'évaluation, soit le coût-efficacité et le coût-bénéfice. Le premier consiste à atteindre et maintenir au coût minimum un objectif de concentration atmosphérique à une certaine date. Le second consiste à maximiser les bénéfices venant des dommages environnementaux évités, auxquels on soustrait les coûts de réduction des émissions. Dans un premier temps, ils ont dérivé les résultats analytiques, puis ils ont fait une simulation numérique.

Les auteurs ont ainsi trouvé que la présence de changement technologique endogène diminue le profil temporel des taxes optimales sur les émissions. De plus, lorsque le changement technologique est dû au R&D, une partie de la réduction est reportée dans le temps. En revanche, avec l'apprentissage par expérience, les résultats analytiques ne permettent pas de déterminer si la réduction des émissions sera devancée ou repoussée.<sup>2</sup> En outre, sous le critère coût-bénéfice, le changement technologique endogène mène à un plus grand niveau cumulatif de réduction des émissions, bien que la réduction ne soit pas nécessairement plus grande à chaque période. Les résultats numériques confirment ce que les auteurs avaient trouvé analytiquement. De plus, ils mettent en évidence les différences pour la taxe optimale à utiliser selon le critère choisi. Entre autres, les effets du changement technologique endogène sont particulièrement élevés pour le critère de coût-efficacité. Ainsi, les modèles qui évaluent cette méthode de régulation sans en tenir compte peuvent s'éloigner beaucoup de la situation optimale. Cependant, cette étude ne tient compte que de la taxe comme méthode de régulation. L'étude suivante compare pour sa part différents instruments de régulation.

*Rivers et Jaccard (2006)*

Ce papier a pour objectif de vérifier si, dans certains cas, l'autorité gouvernementale devrait utiliser une méthode de régulation basée sur des normes plutôt que sur des incitatifs de marché pour obliger l'utilisation d'une technologie

---

<sup>2</sup> Bramoullé et Olson (2005) ont montré qu'il y a un compromis entre l'actualisation des gains et l'apprentissage par expérience pour choisir l'allocation temporelle de la réduction des émissions. Ceci explique pourquoi les résultats analytiques sont ambigus.

propre. Les auteurs se concentrent sur les cas où l'utilisation de la technologie propre est socialement optimale, même si elle est plus coûteuse, à cause de l'apprentissage par expérience. Plus précisément, ils s'intéressent aux cas où les firmes n'investissent pas suffisamment dans la technologie propre que ce soit à cause de l'extension des bénéfices de l'apprentissage par expérience aux autres firmes (« spillover ») ou à cause d'une incertitude quant à la diminution des coûts résultant de l'apprentissage par expérience.

Les résultats, dérivés analytiquement, montrent qu'une régulation par les normes est pratiquement toujours inférieure en termes d'efficacité par rapport aux instruments basés sur des incitatifs de marché. Ainsi, sur la base de ce critère, l'autorité gouvernementale ne devrait pas tenter d'augmenter l'utilisation de la technologie propre par des normes. Cependant, si d'autres critères sont pris en compte, par exemple l'acceptabilité politique et la facilité d'administration, le coût théorique d'instaurer une régulation (non-optimale) basée sur les normes ne serait que de 10% à 20% supérieur par rapport à la régulation optimale. En conséquence, si on se base sur des critères d'évaluation autres que l'efficacité, l'autorité gouvernementale pourrait privilégier une approche basée sur les normes. Pour notre part, nous avons spécifié quels autres critères pourraient être considérés et comment se comporte chacune des méthodes de régulation par rapport à ceux-ci. De plus, comme notre étude comporte une partie expérimentation, nous n'avons pas inclut la notion de « spillover », ni d'incertitude, afin de garder les instructions à un niveau compréhensible. Voyons maintenant ce qui s'est fait au niveau expérimental.

### **3.2. Aspect expérimental**

La première expérience ayant trait aux permis d'émissions échangeables a été réalisée, par Charles Plott (1983). Celui-ci a introduit dans un marché expérimental une externalité qui ne peut être internalisée par un système d'enchères doubles et essayé divers traitements pour la corriger : taxe, normes et permis d'émissions échangeables. Il a trouvé que les permis d'émissions échangeables étaient particulièrement efficaces pour corriger une externalité, les participants atteignant en moyenne plus de 95% des gains possibles. Cette expérience demeure néanmoins limitée en termes de représentation de la réalité. C'est pourquoi les expériences

ultérieures ont tenté de recréer des marchés de permis d'émissions dans une perspective plus réaliste. D'ailleurs, dans les années 1990, les laboratoires ont principalement servi à vérifier l'efficacité des permis d'émissions, tels qu'ils étaient proposés pour les marchés de droits d'émission de SO<sub>2</sub> dans le cadre du CAAA. Des recherches portant sur la mise en banque, l'allocation initiale et le type d'enchères ont notamment été effectuées.<sup>3</sup> Par la suite, d'autres aspects comme le pouvoir de marché (Muller & al., 2002), l'incertitude (Godby & al., 1997) et les coûts de transaction (Cason et Gangadharan, 2003) ont été testés expérimentalement. En fait, depuis la signature du Protocole de Kyoto, les articles sur le sujet se sont littéralement multipliés.

Globalement, ces expériences montrent une augmentation de l'efficacité avec les PÉÉ par rapport à CC, sauf lorsqu'il y a du pouvoir de marché. Ceci constitue un argument de taille en faveur de l'implémentation d'un marché des droits d'émissions. Cependant, les caractéristiques de ce marché influent grandement sur les résultats que ce soit la mise en banque, le type d'allocation ou les coûts de transaction. Il s'avère donc nécessaire de vérifier expérimentalement divers aspects afin d'assurer le meilleur succès possible aux politiques environnementales. D'où l'importance de notre étude qui tient compte de l'apprentissage par expérience, ce qu'aucune des autres études n'avaient fait auparavant. Remarquons aussi que les expériences mentionnées précédemment ne permettaient pas un choix en termes de technologie. En fait, très peu d'études permettent un choix en termes d'investissement. Nous présenterons maintenant quelques papiers expérimentaux dans lesquels un tel choix est possible.

*Gangadharan, Farrell et Croson (2005)*

Le but de ce papier est de déterminer les impacts de trois caractéristiques des permis d'émission échangeables. Plus précisément, les auteurs s'intéressent aux impacts de la possibilité d'investir dans la réduction des émissions, de la possibilité de mise en banque des permis d'émission ainsi que de la diminution dans la quantité d'émission permise, et ce avec et sans incertitude. Ils ont donc réalisé une expérience

---

<sup>3</sup> Pour une revue détaillée des expériences sur les permis d'émissions échangeables, voir a) Charles C. Holt et Mark R. Isaac (1999), *Emissions Permit Experiments*, in *Research in experimental economics* vol.7, b) R. Andrew Muller and Stuart Mestelman (1998) "What Have We Learned From Emissions Trading Experiments?", *Managerial and Decision Economics* 19, pp.225-238 et c) Bohm (2003)

en laboratoire. Toutefois, ils n'ont pas utilisé le design expérimental traditionnel. En effet, ils associent un permis d'émission à un certain niveau de production plutôt que d'associer un niveau de production à une certaine quantité d'émission. Ainsi, ils décrivent les permis d'émission en termes de leur impact sur la production. Bien qu'ils aient utilisé un design expérimental différent, ils ont retrouvé les résultats traditionnels pour l'efficacité générale. Notons que nous avons également utilisé cette approche dans notre design expérimental. Un résultat central de leur étude est que, lorsque les firmes peuvent investir dans des technologies propres, elles le font souvent au-delà du niveau optimal. Ceci mène à des pertes en termes d'efficacité. Puisque l'apprentissage par expérience diminue le coût futur de la technologie propre, la rendant du même coup plus attrayante, ce phénomène devrait être encore plus fort dans nos résultats expérimentaux. Dans le même ordre d'idée, lorsque la mise en banque est permise, les sujets sur-utilisent cette option. Ceci diminue le niveau d'efficacité atteint avec les permis d'émission échangeables.

*Ben-David, Brookshire, Burness, McKee et Schmidt (1999)*

Ce papier a pour objectif de déterminer les impacts sur l'efficacité des permis d'émission des choix de technologie irréversibles, dans l'optique de la réglementation adoptée dans le CAAA. Les auteurs ont d'abord trouvé des résultats analytiques, puis ils ont procédé à une expérience. La particularité de cette expérience est que, lorsqu'une firme choisit une technologie plus propre, elle ne peut retourner à une technologie plus polluante. Il y a quatre traitements qui se distinguent selon le nombre de permis d'émission disponibles et selon le niveau d'hétérogénéité entre les coûts marginaux de réduction des émissions pour les diverses technologies. Cependant, l'apprentissage par expérience n'est pas inclus dans le coût de ces technologies. Les auteurs ont trouvé qu'il n'y avait pas de relation dans les résultats expérimentaux entre le niveau d'hétérogénéité et le nombre d'échanges. De plus, ils ont trouvé qu'un nombre plus important d'échange diminue la variabilité du prix des permis. Par ailleurs, plus il y a d'hétérogénéité, moins le niveau d'efficacité atteint est élevé. Ce résultat est surprenant, puisqu'il y a des gains possibles à l'échange sont plus élevés lorsque l'hétérogénéité est grande. De même, dans notre étude, il y a un niveau d'hétérogénéité différent selon les traitements. Ainsi, il faudrait s'attendre à ce que l'efficacité soit moindre dans le cas plus hétérogène.

Pour conclure, la principale différence entre notre étude et celles mentionnées précédemment consiste en l'introduction de l'apprentissage par expérience. Par ailleurs, en général, les expériences précédentes sur les permis d'émission échangeables ne permettaient pas de choix en termes de technologie. De plus, dans les rares expériences qui le permettent, les sujets ne prennent pas de décision explicite en termes de production. Or, cela est essentiel si on veut déterminer les impacts sur la structure du marché. Enfin, notre étude se distingue des études antérieures par le fait qu'elle se base sur trois critères pour évaluer le choix de la politique environnementale à privilégier plutôt que de ne considérer que l'efficacité. Il est indéniable que l'atteinte de la réduction des émissions au moindre coût est un objectif important dans le choix de l'instrument de régulation, mais d'autres aspects doivent également être pris en considération afin de faire le meilleur choix possible. Voyons maintenant plus en détail les modèles que nous utiliserons comme support à l'expérimentation.

## 4. Analyse théorique

Dans la section qui suit, nous présenterons les modèles théoriques, puis les résultats simulés qui en découlent. Nous utiliserons deux types de modèles pour la simulation. Tout d'abord, nous examinerons un type de modèles où les permis d'émission (échangeables ou non) constituent un mode permanent de régulation, c'est-à-dire que ce mode de régulation sera utilisé pour la totalité des périodes examinées. Le second type de modèle en est un où les permis d'émission (échangeables ou non) constituent un mode de régulation transitoire, c'est-à-dire qu'on ajoute une ou plusieurs périodes où il n'y aura aucun permis d'émission alloué. Ce type de modèles s'avère particulièrement utile dans l'optique où le régulateur veut mener l'industrie à produire proprement après un certain temps. Par ailleurs, dans la réalité, on retrouvera possiblement un amalgame des deux, soit l'instauration de régulation à l'aide de permis d'émission, mais avec une probabilité non-nulle de retrait et/ou réduction des permis d'émission à long terme. Le fait d'utiliser distinctement les deux types de modèles met en évidence les impacts de la suspension des permis d'émission, facilitant ainsi la généralisation pour le cas avec probabilité non-nulle d'obligation à produire avec la technologie propre à terme.

### 4.1. Modèles utilisés

#### 4.1.1 *Modèles permanents*

Le modèle général comporte  $I$  périodes ( $i= 1, 2, \dots, I$ ) et  $J$  firmes ( $j=1, 2, \dots, J$ ). Nous faisons l'hypothèse que les firmes font face à la concurrence mondiale. En conséquence, elles prennent le prix de vente de leur output comme donné. On suppose que l'objectif de chaque firme est de maximiser la somme de ses profits sur les deux périodes. Autrement dit, nous utiliserons un taux d'actualisation nul. De plus, nous supposons qu'il y a deux types de technologie : une technologie propre et l'autre polluante. Pour produire, les firmes peuvent utiliser l'une ou l'autre des technologies ou une combinaison des deux. Les firmes doivent donc prendre des



décisions en termes de quantité produite, d'émission de polluant et de technologie propre à utiliser. Il y aura deux modèles : un avec permis d'émission échangeables (PÉÉ) et l'autre avec des permis d'émission non-échangeables (CC).

### Modèle avec les PÉÉ

À la période  $i$ , la firme  $j$  produit un output,  $Q_{ij}$ . Lorsqu'il y a régulation des émissions, pour produire une unité, la firme doit soit utiliser un permis d'émission (A), soit utiliser une unité de technologie propre (B). On a ainsi une fonction de production  $Q_{ij}(A_{ij}, B_{ij}) = A_{ij} + B_{ij}$ , où  $A_{ij} \geq 0$  est la quantité de permis d'émissions utilisée pour la période et  $B_{ij} \geq 0$  est la production avec technologie propre pour la période.

Par ailleurs, à chaque période, un permis d'émission est remis gratuitement à chacune des firmes.<sup>4</sup> Les firmes ont ensuite la possibilité d'acheter ou vendre ces permis dans une vente à enchères doubles.<sup>5</sup> Nous dénotons  $P_{Aij}$  le prix moyen des permis d'émission de la firme  $j$  pour la période  $i$ .<sup>6</sup> Ceci donne la quantité de permis d'émission utilisée pour la période. Autrement dit, les firmes ne peuvent pas conserver leurs permis d'émission pour les utiliser à une période ultérieure. Chaque permis doit être utilisé à la période à laquelle il a été donné.

Par la suite, chaque firme choisit son niveau de production avec technologie propre pour la période. Nous définissons le prix de la technologie propre ( $P_{Bij}$ ) comme le différentiel du coût de production d'une unité à l'aide de la technologie propre par rapport à la technologie polluante, incluant le différentiel dans le coût des intrants et dans le coût d'utilisation de la technologie. Nous supposons le coût de production avec la technologie propre plus élevé ou égal au coût de production avec la technologie polluante, c'est-à-dire  $P_{Bij} \geq 0$ . De plus, le prix de la technologie propre,  $P_{B_{i,j}} = T / \left( \sum_{k=0}^{i-1} B_{kj} \right)$ , décroît avec l'utilisation passée de cette technologie. Ainsi, plus les firmes ont d'expérience dans l'utilisation de la technologie propre,

<sup>4</sup> Nous avons choisi l'octroi gratuit (« grandfathering ») comme méthode d'allocation initiale, car elle est souvent vue comme la méthode la plus faisable politiquement, et donc la plus probable en réalité. C'est d'ailleurs ce que font les mécanismes du Protocole de Kyoto en accordant à chaque pays le droit d'émettre une certaine quantité d'émissions de gaz à effet de serre.

<sup>5</sup> Nous avons choisi ce type de vente aux enchères, car les résultats convergent plus rapidement vers l'équilibre compétitif, et ce avec un nombre limité de joueurs. De plus, nous faisons l'hypothèse de symétrie des pouvoirs de négociation pour la vente aux enchères.

<sup>6</sup> Nous utilisons un prix moyen, car le prix de chaque permis d'émission est déterminé de façon individuelle par la vente aux enchères.

plus la différence de coût de production entre les deux types de technologie s'atténue. Ceci intègre la notion d'apprentissage par expérience dans notre modèle. Nous supposons la technologie polluante mature, de sorte à ce que l'apprentissage par expérience dans cette technologie soit négligeable.

Nous supposons que toutes les firmes comportent certaines caractéristiques exogènes qui influent sur leur facilité à intégrer la technologie propre. Il pourrait s'agir, par exemple, de l'âge et des qualifications de la main-d'œuvre ou de particularité de l'usine qui facilitent l'utilisation de la technologie propre. Nous appellerons cet ensemble de caractéristique expérience initiale, et le dénoterons  $B_{0j}$ . Notons également que  $B_{0j}$  diffère selon les firmes. C'est donc ici que l'on introduit l'asymétrie. Il y aura donc des firmes initialement « plus expérimentées » et d'autres « moins expérimentées ». L'impact de cette asymétrie est que les firmes initialement plus expérimentées peuvent se procurer la technologie propre à un coût inférieur par rapport aux firmes initialement moins expérimentées, toutes autres choses étant égales par ailleurs. Nous faisons l'hypothèse supplémentaire que  $B_{0j} \geq 1$  pour tout  $j$ . Ainsi, nous définissons  $T$  le coût initial de la technologie propre ( $P_{Bij}$  en période 1 lorsque  $B_{0j}=1$ ).

Enfin, nous définissons la fonction de revenu  $C(Q_{ij})$ .<sup>7</sup> Notons que cette fonction inclut tous les coûts qui ne changent pas avec le type de technologie utilisée. Par exemple, dans le cas d'une firme qui peut produire de l'électricité à partir de charbon ou de gaz naturel, le coût de ces intrants ne serait pas inclut dans  $C(Q_{ij})$ . En revanche, le coût du personnel y est inclus si les deux technologies nécessitent la même main-d'œuvre de base. Par ailleurs, nous définissons  $P$ , le prix de vente de l'output auquel on soustrait les coûts de production spécifiques à la technologie polluante pour une unité de production.

Enfin, notons que les profits de la firme dépendent de ses choix en matière de permis et de technologie propre. Plus précisément,

Équation 1

$$\pi_{ij}(A_{ij}, B_{ij}) = P * (A_{ij} + B_{ij}) - C(A_{ij} + B_{ij}) - P_{A_{ij}}(A_{ij} - 1) - P_{B_{ij}}B_{ij}.$$

<sup>7</sup> Avec  $C(Q_{ij}) > 0$ ,  $\partial C(Q_{ij}) / \partial Q_{ij} > 0$ ,  $\partial^2 C(Q_{ij}) / \partial Q_{ij}^2 > 0$ , de sorte à assurer un équilibre compétitif. Dans ce cas, la firme produit de sorte à ce que le prix qu'elle reçoit soit égal au coût marginal de la dernière unité produite.

Remarquons que si la firme vend son permis d'émission ( $A_{ij}=0$ ), alors le prix reçu pour le permis d'émission s'additionne aux revenus provenant de la vente de l'output. En résumé, l'objectif de la firme  $j$  est

$$(Eq. 2) \quad Max_{\{A_{ij}, B_{ij}\}_{i=1, \dots, I}} \sum_{i=1}^I \pi_{ij}(A_{ij}, B_{ij})$$

Enfin, nous supposons que les firmes ne peuvent pas tricher, c'est-à-dire qu'elles ne polluent pas au-delà de la limite accordée par les permis d'émission qu'elles possèdent pour une période.

### Modèle avec CC

Ce modèle ressemble beaucoup au modèle précédent, à la différence qu'il n'y a pas de vente aux enchères de permis d'émission. Ainsi, les firmes reçoivent un permis à chaque période, mais ne peuvent s'en procurer d'autres. Toute production supérieure à une unité nécessite donc la technologie propre. La détermination du prix de cette technologie demeure telle que dans le modèle précédent. De même, toutes les autres hypothèses demeurent identiques à celles du modèle avec les PÉÉ. En particulier, les profits de la firme sont définis tels que dans l'équation 1, mais avec  $A_{ij}=1$ . Pareillement, la fonction objectif demeure telle que stipulée dans l'équation 2.

#### *4.1.2 Modèles transitoires*

Ce modèle diffère des modèles précédents par l'ajout de  $K$  périodes supplémentaires au cours desquelles aucun permis d'émission n'est remis aux firmes. Il y a donc un total de  $I+K$  périodes et  $A_{I+kj}=0$ ,  $P_{A_{I+kj}}=0$  pour  $k=1, 2, \dots, K$ . Ainsi, si elles veulent produire lors des périodes  $I+1$  à  $I+K$ , les firmes doivent obligatoirement utiliser la technologie propre. En conséquence, l'ajout de ces périodes augmente les gains potentiels liés à l'apprentissage par expérience. Notons que la définition des modèles transitoires avec les PÉÉ et avec CC demeure identique aux modèles permanents pour tout le reste. Voici la fonction objectif :

$$Max_{\{A_{ij}, B_{ij}\}} \sum_{i=1}^{I+K} \pi_{ij}(A_{ij}, B_{ij})$$

où  $i = 1, \dots, I + K$ ,  $A_{I+kj} = 0$  et  $P_{A_{I+kj}} = 0$  pour  $k = 1, \dots, K$

et  $\pi_{ij}(A_{ij}, B_{ij})$  tel que défini dans l'équation 1.

La résolution analytique des modèles présentés donnant des résultats souvent ambigus et difficilement interprétables, nous avons simulés des résultats numériques pour différents prix de vente, coûts de production et coûts initiaux de la technologie propre. Ceci nous donne une idée plus claire du comportement théorique des firmes dans chacun des modèles détaillés précédemment. Ces résultats sont présentés à la section suivante.

#### 4.2 Résultats simulés

Pour la simulation, nous avons fait interagir 6 firmes ( $J=6$ ). Par ailleurs, nous avons posé  $B_{0j}=1$  pour  $j \in \{1, 2, 3\}$  et  $B_{0j}=2$  pour  $j \in \{4, 5, 6\}$ . Ainsi, il y a deux types de firmes : les firmes « plus expérimentées » et les firmes « moins expérimentées ». Nous avons simulé les résultats pour différentes combinaisons de prix de vente ( $P$ ), de fonctions de coût de production ( $C(Q_{ij})$ ) et de coûts initiaux de la technologie propre ( $T$ ). Étant donné que nous avons défini le prix de la technologie propre comme un ratio du coût initial par rapport à l'expérience en utilisation, nous ne ferons pas varier  $B_{0j}$ , puisque nous faisons varier  $T$ .

Plus précisément, nous avons successivement posé le nombre de périodes  $I=2$  et  $I=3$ . Pour les modèles transitoires, nous avons posé  $K=1$  pour  $I=2$  et  $K \in \{1,2\}$  pour  $I=3$ . De plus, on a fait passer de  $P=60$  à  $P=300$  en augmentant par tranches de 60. Nous avons utilisé une fonction de coûts de production de base du type  $C(Q_{ij})=c \cdot Q_{ij}^\alpha$  avec  $\alpha = 2$  et  $\alpha = 3/2$ . On a fait varier de  $c=10$  à  $c=50$  avec une augmentation par tranches de 10 pour  $\alpha = 2$ . On a fait varier de  $c=40/\sqrt{3}$  à  $c=200/\sqrt{3}$  par tranches de  $40/\sqrt{3}$  pour  $\alpha = 3/2$ .<sup>8</sup> Enfin, nous avons fait varier de  $T=10$  à  $T=100$  par tranches de 10. Pour faire ces simulations, nous avons utilisé le logiciel « Matlab ». Nous avons adapté la programmation pour chacun des 4 modèles. Nous présenterons d'abord l'analyse des résultats avec les modèles permanents, puis avec les modèles transitoires.

---

<sup>8</sup> Nous avons utilisé ces valeurs, car elles donnent des quantités produites entières sans régulation.

#### 4.2.1. Simulation pour les modèles permanents

Le principal résultat qui se dégage de ces simulations est que les décisions en termes de quantité de permis d'émission, de technologie propre et de production dépendent essentiellement du coût initial relatif de la technologie propre. C'est-à-dire que les mêmes résultats se répètent pour différents prix et fonction de production lorsque le coût initial de la technologie propre varie, et ce peu importe le nombre de périodes. Notons que ces cas similaires ne sont pas obtenus pour un même  $T$ , mais pour une même proportion de  $T$  relativement aux  $P$  et  $C(Q_{ij})$ . De plus, cette proportion doit être plus élevée lorsqu'il y a trois périodes.<sup>9</sup> Nous différencierons donc les résultats selon que le coût initial de la technologie propre soit relativement faible, moyen ou élevé. Nous observerons les impacts de la méthode de régulation de la pollution mise en place par le régulateur (PÉE ou CC) sur les profits des firmes, la structure du marché et les investissements dans la technologie propre.<sup>10</sup>

Avant de se pencher sur l'analyse des résultats numériques, mentionnons que nous illustrerons les résultats obtenus avec un exemple à 2 périodes pour  $P=120$ ,  $C(Q_{ij}) = 20 Q_{ij}^2$  et  $T = 10, 35$  et  $90$  pour les coûts initiaux relativement faibles, moyens et élevés respectivement. Notons que ce sont les paramètres que nous utiliserons lors de l'expérimentation. Dans ce cas, sans régulation, toutes les firmes produisent 3 unités par période. De plus, seule la technologie polluante est utilisée. Il s'agira de notre point de référence pour la structure du marché. Voyons d'abord ce qui se dégage de l'analyse des résultats pour l'ensemble des coûts initiaux relatifs de la technologie propre, puis nous nous pencherons sur les cas particuliers.

##### a) Résultats généraux

Tout d'abord, notons que les résultats simulés sous PÉE nous donnent un comportement à l'équilibre qui concorde avec le comportement d'un régulateur social qui maximise les profits de toutes les firmes pour toutes les périodes. On retrouve donc la particularité des permis d'émission d'atteindre un équilibre qui concorde avec l'optimum social (en termes d'efficacité). Ainsi, les profits totaux obtenus avec les PÉE sont supérieurs à ceux obtenus avec CC. De plus, les profits

<sup>9</sup> Ce qui est tout à fait normal, puisque sur trois périodes, les gains potentiels à l'apprentissage par expérience sont plus élevés.

<sup>10</sup> Par investissements dans la technologie propre, on entend production avec technologie propre.

individuels obtenus avec les PÉÉ sont supérieurs à ceux obtenus avec CC tant pour les firmes moins expérimentées que plus expérimentées. En conséquence, l'introduction de la notion d'apprentissage par expérience ne modifie pas la désirabilité des PÉÉ du point de vue de l'efficacité.

Par ailleurs, à l'équilibre, toutes les firmes plus expérimentées adoptent le même comportement et toutes les firmes moins expérimentées adoptent le même comportement, tant avec les PÉÉ qu'avec CC. Nous présenterons donc les résultats pour une firme modèle de chaque type. De plus, pour tous les niveaux de coût initial de la technologie propre, à l'optimum avec les PÉÉ, les firmes plus expérimentées n'utilisent pas de permis d'émission. En revanche, les firmes moins expérimentées utilisent chacune deux permis d'émission à toutes les périodes avec les PÉÉ. Ainsi, les firmes plus expérimentées vendent leur permis d'émission aux firmes moins expérimentées et n'utilisent que la technologie propre pour produire leur output. Ceci s'explique par un prix de la technologie propre relativement plus faible pour les firmes plus expérimentées par rapport aux firmes moins expérimentées. Ceci est dû à l'apprentissage par expérience. De même, avec CC, les firmes des deux types ont avantage à utiliser leur permis d'émission pour tous les paramètres utilisés lors de la simulation. Ainsi, les résultats pour différents coûts initiaux relatifs de la technologie propre se distinguent donc uniquement par le niveau de production avec technologie propre des firmes plus et moins expérimentées, tant avec les PÉÉ que CC.

#### b) Coût initial faible de la technologie propre<sup>11</sup>

Dans ce cas, les quantités produites avec les PÉÉ et CC sont les mêmes que sans régulation des émissions. Autrement dit, les firmes plus et moins expérimentées ne modifient pas les quantités qu'elles produisent suite à l'instauration de la régulation. Il n'y a donc pas de différenciation en termes de structure du marché selon l'alternative. De même, il n'y a pas de différence dans le niveau total d'investissement dans la technologie propre selon que la réglementation soit de type PÉÉ ou CC. Cependant, il y a une différence selon la répartition des investissements. En effet, les firmes moins expérimentées ont des investissements inférieurs avec les PÉÉ que CC. Tandis que les firmes plus expérimentées ont des investissements

---

<sup>11</sup> Il s'agit d'un abus de langage. Il faudrait dire coût initial relativement faible de la technologie propre. Pour alléger le texte, nous laisserons cependant tomber le « relativement » ou « relatif » pour la suite du papier. Il faut cependant garder en tête que l'on ne s'intéresse pas qu'au T, mais au T par rapport à P et C( $Q_{ij}$ ).

supérieurs sous PÉÉ que sous CC. Donc, en considérant les trois critères d'évaluation, le régulateur devrait privilégier PÉÉ plutôt que CC, sur la base de profits plus élevés pour les firmes, les autres critères ne comportant pas de différence selon l'alternative.

Le tableau 1 donne une illustration numérique pour  $T=10$ . On remarque qu'il n'y a pas de distinction entre les méthodes utilisées au niveau des quantités produites, puisque toutes les firmes produisent la même quantité qu'avant la réglementation, soit 3 unités par période. Notons également que les profits totaux sont plus élevés avec les PÉÉ que CC. Il importe de préciser que, pour calculer les profits, nous avons supposé le pouvoir de négociation égal entre les différents partis et donc un prix de vente des permis médian. Enfin, au niveau des investissements en technologie propre, on remarque qu'ils sont plus élevés sous CC pour les firmes moins expérimentées, mais plus faibles pour les firmes plus expérimentées. La quantité totale de technologie propre utilisée étant égale dans les deux cas, il n'y a pas d'avantage au niveau des incitatifs à investir en technologie pour l'une ou l'autre des alternatives. On confirme donc que, selon les trois critères utilisés, le régulateur devrait privilégier PÉÉ plutôt que CC pour un coût initial de la technologie relativement faible.

**Tableau 1- Résultats simulés avec coût initial faible de la technologie propre**

PÉÉ								CC							
Plus expérimentée				Moins expérimentée				Plus expérimentée				Moins expérimentée			
A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>
0	3	0	3	2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	2
Quantité totale : 6				Quantité totale : 6				Quantité totale : 6				Quantité totale : 6			
Profit total : 348,2				Profit total : 335,9				Profit total : 345				Profit total : 333,3			
Technologie propre au total : 8								Technologie propre au total : 8							
Sous PÉÉ, $P_A$ se situe entre 3,8 et 7,5 en période 1 et entre 2 et 5 en période 2.															
Sans régulation, $A_{ij} = 3$ et $B_{ij} = 0$ pour tout $i$ , pour tout $j$ .															

c) Coût initial moyen de la technologie propre

L'impact sur la structure du marché et les investissements en technologie propre constitue la principale distinction avec le cas précédent. Remarquons d'abord

que, dans les deux cas, les firmes plus expérimentées continueront à produire la quantité d'équilibre sans régulation, et ce strictement à l'aide de la technologie propre. Pour leur part, les firmes moins expérimentées produiront une quantité inférieure à celle sans régulation sous les deux alternatives. En conséquence, les firmes plus expérimentées occuperont une plus grande part du marché. Ce phénomène sera d'autant plus marqué avec les PÉÉ qu'avec CC. En conséquence, les quantités totales produites sont plus élevées avec CC que PÉÉ.

Les impacts mentionnés sur la structure de marché relèvent directement des incitatifs à investir dans la technologie propre. Intuitivement, les firmes moins expérimentées n'ont maintenant avantage à investir dans la technologie propre qu'avec CC. En effet, puisqu'elles ne peuvent pas se procurer de permis d'émission supplémentaire sous CC, il est avantageux pour les firmes moins expérimentées d'investir dans la technologie propre en période 1 afin d'augmenter leur production. En période 2, l'apprentissage par expérience réduit les coûts de l'investissement, ce qui permet une production au niveau sans régulation. En revanche, sous PÉÉ, avec un initial relativement moyen de la technologie propre, il est plus avantageux pour les firmes moins expérimentées de réduire leur production par rapport à la situation sans régulation plutôt que d'investir dans la technologie propre, et ce pour les deux périodes. Ceci se traduit par une quantité produite par les firmes moins expérimentées plus élevée sous CC que sous PÉÉ. Le niveau d'investissement dans la technologie propre est donc plus élevé sous CC. Ainsi, pour un coût initial de la technologie propre relativement moyen, il n'y a pas de conclusion claire quant à l'instrument de régulation à favoriser. Dépendamment de la prépondérance des critères d'évaluation, l'une ou l'autre des alternatives peut être privilégiée.

Le tableau 2 donne une illustration numérique pour  $T=35$ . On remarque que, sous PÉÉ, les firmes moins expérimentées produisent au total 2 unités de moins que les firmes plus expérimentées. En revanche, sous CC, les firmes moins expérimentées produisent au total 1 seule unité de moins que les firmes plus expérimentées. Ainsi, l'asymétrie dans la structure de marché est plus grande sous PÉÉ. Ceci est dû aux investissements en technologie propres plus élevés sous CC pour les firmes moins expérimentées. Par ailleurs, notons que les profits totaux sont encore une fois plus élevés avec les PÉÉ que CC. Ainsi, on confirme que la



désirabilité d'une alternative par rapport à l'autre dépend de l'importance accordée à chacun des critères d'évaluation.

**Tableau 2- Résultats simulés avec coût initial moyen de la technologie propre**

PÉE								CC							
Plus expérimentée				Moins expérimentée				Plus expérimentée				Moins expérimentée			
A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>
0	3	0	3	2	0	2	0	1	2	1	2	1	1	1	2
Quantité totale : 6				Quantité totale : 4				Quantité totale : 6				Quantité totale : 5			
Profit total : 318,5				Profit total : 288				Profit total : 307,5				Profit total : 270			
Technologie propre au total : 6								Technologie propre au total : 7							
Sous PÉE, P <sub>A</sub> se situe entre 13,3 et 26,3 en période 1 et entre 7 et 17,5 en période 2.															
Sans régulation, A <sub>ij</sub> = 3 et B <sub>ij</sub> = 0 pour tout i, pour tout j.															

#### d) Coût initial élevé de la technologie propre

Ce cas se distingue du précédent principalement par le fait que les firmes moins expérimentées n'ont pas avantage à investir dans la technologie propre, devenue trop coûteuse, ni avec les PÉE, ni avec CC. Ainsi, leur niveau de production est plus élevé sous PÉE. En effet, dans ce cas, les firmes moins expérimentées peuvent se procurer des permis d'émission auprès des autres firmes. En revanche, leur production est limitée à une unité par période sous CC. Pour leur part, les firmes plus expérimentées continueront à utiliser la technologie propre, mais elles en diminueront la quantité. Leur niveau de production diminuera en-dessous du niveau sans régulation. Ceci aura des effets sur la structure du marché. Premièrement, la quantité totale produite sera supérieure avec les PÉE. Deuxièmement, l'asymétrie sera plus grande avec CC. Enfin, les seuls investissements en technologie propre sont faits par les firmes plus expérimentées. Or, avec CC, elles investissent moins, puisqu'elles utilisent leur permis, ne pouvant le vendre. En conséquence, les PÉE favorise davantage les investissements en technologie propre que CC. Ainsi, le régulateur devrait privilégier PÉE, et ce pour chacun des trois critères d'évaluation.

Le tableau 3 donne une illustration numérique pour T=90. Ici, sous PÉE, toutes les firmes produisent deux unités par périodes. Cependant, sous CC, les firmes

moins expérimentées ne produisent qu'une seule unité par période. On voit donc que la quantité totale produite est supérieure sous PÉÉ et que la structure du marché n'est asymétrique que sous CC. Cela est dû au coût initial de la technologie propre trop élevé pour que les firmes moins expérimentées investissent, et ce dans les deux cas. Cependant, avec les PÉÉ, elles peuvent se procurer des permis et produire davantage. De plus, les investissements en technologie propre sont plus élevés sous PÉÉ. Finalement, les profits totaux sont plus élevés avec les PÉÉ que CC. Donc, on confirme que, selon les trois critères évalués, le régulateur devrait privilégier les PÉÉ comme instrument de régulation de la pollution.

**Tableau 3- Résultats simulés avec coût initial élevé de la technologie**

PÉÉ								CC							
Plus expérimentée				Moins expérimentée				Plus expérimentée				Moins expérimentée			
A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>
0	2	0	2	2	0	2	0	1	1	1	1	1	0	1	0
Quantité totale : 4				Quantité totale : 4				Quantité totale : 4				Quantité totale : 2			
Profit total : 295,7				Profit total : 209,3				Profit total : 245				Profit total : 200			
Technologie propre au total : 4								Technologie propre au total : 2							
Sous PÉÉ, P <sub>A</sub> se situe entre 33,8 et 67,5 en période 1 et entre 22,5 et 67,5 en période 2															
Sans régulation, A <sub>ij</sub> = 3 et B <sub>ij</sub> = 0 pour tout i, pour tout j.															

Pour conclure l'analyse des modèles permanents, notons que les trois cas mentionnés précédemment ne sont pas exhaustifs. Par exemple, pour un niveau de coût initial de la technologie propre très élevé, aucune firme n'investit dans la technologie propre. À cause des revenus marginaux décroissant avec la production, il n'y aura pas d'échange de permis puisque, la première unité produite génère plus de revenus que la seconde. Ainsi, les PÉÉ et CC donnent les mêmes résultats. D'autres cas transitoires existent également. Cependant, dans les trois cas que nous avons détaillés, on remarque d'abord que les PÉÉ permettent aux deux types de firmes (plus expérimentées et moins expérimentées) d'obtenir des profits plus élevés que CC. En revanche, sauf pour des coûts de la technologie relativement élevés, CC favorise davantage l'investissement en technologie propre que les PÉÉ. En effet, les firmes moins expérimentées ne peuvent produire plus d'une unité sans technologie propre sous CC. Elles n'ont donc pas d'autres choix que d'investir dans la

technologie propre pour produire la quantité désirée. En revanche, avec les PÉÉ, elles peuvent acheter des permis d'émission pour produire. Enfin, les effets sur la structure du marché dépendent du coût relatif de la technologie propre. On ne peut donc pas déterminer quel instrument est le meilleur selon ce critère. En somme, l'instrument de régulation à privilégier dépend des coûts initiaux relatifs de la technologie propre ainsi que de l'importance accordée à chacun des critères d'évaluation, soient la minimisation des coûts, l'investissement dans la technologie propre et la structure du marché. Nous vérifierons ultérieurement comment les résultats numériques obtenus par simulation se comparent avec les résultats expérimentaux.

#### 4.2.2. *Simulation des résultats pour les modèles transitoires*

En général, comme pour la simulation des modèles permanents, on retrouve les mêmes cas qui se répètent pour un nombre différent de périodes. Toutefois, plus il y a de périodes (tant avec que sans permis), plus le coût initial relatif de la technologie doit être élevé pour obtenir un certain résultat. Ceci s'explique par une augmentation des gains potentiels à l'apprentissage par expérience, ce qui augmente l'attractivité de la technologie propre. De même, pour tout niveau de coût initial de la technologie propre, l'élimination des permis d'émission en dernière(s) période(s) incite les firmes moins expérimentées à investir davantage et plus rapidement dans cette technologie, et ce avec les deux alternatives. Elles peuvent ainsi profiter de l'apprentissage par expérience pour produire lorsqu'il n'y aura plus de permis d'émission disponibles. Cependant, cet effet est plus important avec les PÉÉ, puisque, dans le modèle permanent, les firmes moins expérimentées n'investissaient pas dans cette technologie dès que son coût était relativement moyen. Pour leur part, les firmes plus expérimentées ont, elles aussi, de plus grands incitatifs à investir dans la technologie propre, mais uniquement pour les cas où elles produisaient une quantité inférieure à celle sans régulation dans les modèles permanents.

Ainsi, on retrouve les cas mentionnés avec les modèles permanents, mais pour des coûts initiaux de la technologie propre plus élevés. Autrement dit, on finit par obtenir les mêmes résultats, mais pour un  $T$  nettement plus grand. Nous ne représenterons donc pas ici les résultats numériques. De même, nous ne procéderons

pas à la phase d'expérimentation pour ces modèles à cause contraintes de temps et de ressources. Néanmoins, il pourrait être intéressant de réaliser cette expérience dans une recherche ultérieure. Fait particulier à noter : pour un coût initial de la technologie relativement très élevé, il peut être avantageux pour les firmes moins expérimentées de n'utiliser que des permis d'émission au cours des premières périodes et de ne pas produire lorsqu'il n'y a pas de permis d'émission. En conséquence, les impacts sur la structure du marché sont encore plus importants que dans les modèles permanents.

En somme, comparativement au cas à deux périodes, il existe un moins grand écart dans les incitatifs à investir dans la technologie propre selon que la méthode de régulation des émissions utilisée. Les différences au niveau de la structure du marché sont donc lissées pour des coûts initiaux relativement pas trop élevés de la technologie propre. En revanche, sous des cas plus extrêmes, il peut s'avérer optimal pour les firmes moins expérimentées de ne pas produire en dernière période. Ceci accentue l'asymétrie de la structure de marché, puisque la moitié des firmes aurait une production nulle. En bref, annoncer à l'avance que l'objectif à long terme est de réduire à zéro les émissions ou en laisser planer le doute constitue une bonne stratégie pour le régulateur qui voudrait inciter les investissements en technologie propre. En particulier, la désirabilité des PÉÉ par rapport à CC augmente dans ce cas.

#### **4.3. Principales conclusions de l'analyse théorique**

Quelques conclusions générales ressortent de la simulation. Nous les faisons pour les modèles permanents, puisque c'est ce que nous allons expérimenter, mais elles se généralisent aux modèles transitoires pour des niveaux de coûts initiaux de la technologie propre relatifs plus élevés. Tout d'abord, les PÉÉ permettent aux deux types de firmes (plus expérimentées et moins expérimentées) d'obtenir des profits plus élevés que CC. En effet, les firmes obtiennent de plus grands profits, car elles peuvent tirer des gains de l'échange de permis d'émission. Cette possibilité de gain provient de la différence de prix de la technologie propre résultant de l'asymétrie dans le niveau initial d'expérience dans l'utilisation de cette technologie. Ainsi, à chaque période, toutes les firmes plus expérimentées vendent leur permis d'émission et ne produisent qu'avec la technologie propre. De même, toutes les firmes moins

expérimentées achètent un permis d'émission. C'est ce processus qui permet à PÉÉ de produire des profits plus élevés que CC. Nous vérifierons expérimentalement si les sujets se comportent de cette façon sous PÉÉ.

Hypothèse 1 :

*a) Les PÉÉ permettent d'atteindre des profits totaux plus élevés que CC.*

*b) Les PÉÉ permettent aux firmes plus et moins expérimentées d'obtenir individuellement des profits plus élevés que CC.*

Hypothèse 2 :

*a) Sous PÉÉ, les firmes plus expérimentées vendent le permis d'émission qui leur est remis au début de chaque période. Ces permis sont achetés par les firmes moins expérimentées, et ce pour tout niveau de coût initial de la technologie propre.*

*b) Sous PÉÉ, les firmes plus expérimentées ne produisent qu'avec la technologie propre.*

Par ailleurs, sauf pour un coût initial de la technologie propre relativement élevé, CC favorise davantage l'investissement en technologie propre que PÉÉ. En effet, les firmes moins expérimentées ne peuvent produire plus d'une unité sans utiliser de technologie propre sous CC. Elles doivent donc investir dans la technologie propre pour produire la quantité désirée. En revanche, avec les PÉÉ, les firmes moins expérimentées n'investiront pas dans la technologie propre, sauf si le coût initial de la technologie est relativement faible. Nous vérifierons également cet aspect dans lors de l'expérimentation.

Hypothèse 3 :

*a) Sous PÉÉ, les firmes « moins expérimentées » n'utilisent pas la technologie propre, sauf si son coût initial est relativement faible.*

*b) Sous PÉÉ les firmes moins expérimentées utilisent moins la technologie propre que sous CC.*

Enfin, les effets sur la structure du marché dépendent du coût relatif de la technologie propre. On ne peut donc pas déterminer en général quel instrument est le meilleur selon ce critère. Néanmoins, nous remarquons que les quantités totales produites diminuent lorsque le coût relatif initial de la technologie propre augmente,

et ce tant pour PÉÉ que CC. Ceci résulte de la diminution de la production avec technologie propre par les deux types de firmes lorsque son coût augmente. Pour terminer, mentionnons que, sous PÉÉ, le marché n'est asymétrique que pour un coût initial relatif moyen de la technologie propre. Dans ce cas, les firmes plus expérimentées produisent plus que les firmes moins expérimentées. Nous vérifierons également ces aspects lors de l'expérimentation.

Hypothèse 4 :

*a) Les quantités totales produites et de technologie propre diminuent lorsque le coût initial de la technologie propre augmente.*

*b) La structure du marché sous PÉÉ n'est asymétrique que pour un coût initial moyen de la technologie propre. Dans ce cas, ce sont les firmes plus expérimentées qui produisent une plus grande quantité que les firmes moins expérimentées.*

*c) La structure du marché sous CC est plus symétrique que PÉÉ uniquement dans le cas avec coût initial moyen de la technologie propre.*

Pour conclure, l'instrument à privilégier dépend de l'importance relative accordée à chacun des critères, soient le niveau de profits, l'investissement dans la technologie propre et la structure du marché. Maintenant que nous avons trouvé ces résultats théoriques, nous voudrions savoir s'ils se réalisent en pratique. Comme nous n'avons pas les données nécessaires pour procéder à une étude économétrique de la situation réelle, nous allons créer une situation artificielle dans un environnement contrôlé. Les résultats obtenus ne représentent donc pas nécessairement la réalité, mais il s'agit d'un compromis entre théorie et pratique. Nous allons donc faire une série d'expériences en laboratoire où l'on tentera de déterminer si nos hypothèses sont valides ou non.

## 5. Design expérimental

Lors de l'expérience en laboratoire, nous avons testé le modèle à 2 périodes avec les PÉÉ. Nous n'avons pas testé le modèle permanent sous CC, ni les modèles transitoires à cause de contraintes de temps et de ressources. Il pourrait néanmoins être intéressant de le faire dans une recherche ultérieure. Mentionnons que, lors de l'analyse des résultats, nous comparerons les résultats expérimentaux des PÉÉ avec les résultats simulés des CC. Il aurait été préférable d'avoir des données expérimentales pour les deux alternatives. Néanmoins, on peut raisonnablement imaginer que si les sujets ont un niveau de sophistication suffisamment élevé, les résultats en laboratoire devraient concorder avec les résultats simulés, puisqu'il n'y a pas d'interaction entre les sujets sous CC. Ainsi, nous comparerons les résultats expérimentaux sous PÉÉ avec les résultats simulés sous CC.

Nous procéderons donc à trois traitements (T1, T2, T3). Chacun des traitements représente le modèle à deux périodes avec les PÉÉ pour des coûts initiaux de la technologie propres respectivement faible ( $T=10$ ), moyen ( $T=35$ ) et élevé ( $T=90$ ). Les instructions ainsi que la feuille de jeu se trouvent à l'Annexe I. Mentionnons aussi que l'expérience a été programmée et conduite avec le logiciel z-Tree (Fischbacher, 1999).

Au cours de la session en laboratoire, les sujets représentent une firme et doivent faire des choix en matière de technologie propre et de permis d'émission. La rémunération des sujets dépend des profits qu'ils obtiennent, soit en moyenne 25\$ pour une session de 2h. Au cours du jeu, les sujets accumulent des profits sous forme d'unité monétaire expérimentale (UME) qui sont convertis en dollars canadiens à la fin de l'expérience. Ce montant est remis à la fin de la session en privé, en argent comptant, en plus des 10\$ pour être arrivé à l'heure prévue.

Au total, il y a 6 sessions, soient 2 sessions pour chacun des traitements. Chaque session se divise en 6 rondes. Chaque ronde représente une répétition du

modèle, et, de ce fait, comporte 2 périodes. Chaque session regroupe 18 sujets.<sup>12</sup> Aucun sujet ne peut participer à plus d'une session. Avant le début de la session, les sujets sont répartis également et aléatoirement dans les catégories « plus expérimentés » et « moins expérimentés ». Les sujets demeurent dans la même catégorie tout au long de la session. De plus, avant chaque début de ronde, les sujets sont divisés au hasard en trois groupes de six sujets.<sup>13</sup> Chaque groupe comporte trois sujets de la catégorie plus expérimentés et trois sujets de la catégorie moins expérimentés. Les groupes sont reformés chaque ronde, de sorte à limiter les effets d'échantillonnage. Notons que ces caractéristiques sont de connaissance commune.

Chaque ronde se divise en 2 périodes. Au début de chaque période, un permis d'émission est remis gratuitement à chacun sous le nom de bien A. Pour ne pas influencer les choix des sujets, nous avons porté une attention toute particulière à ne pas leur dévoiler la nature exacte de ce bien. On évite ainsi d'impliquer des considérations personnelles quant à l'environnement. Dans un premier temps, les sujets participent à une vente à enchères doubles d'une durée de 90 secondes pour se procurer ou vendre le bien A. Nous avons choisi ce type d'enchères, car les résultats compétitifs sont en général atteints rapidement et avec peu de sujets (Kagel et Roth, Ed.,1995 et Davis et Holt,1993). Par ailleurs, notons qu'il n'y a pas de restriction quant au fait qu'un sujet puisse à la fois être acheteur ou vendeur. Cela ouvre la voie à la spéculation, mais colle davantage à la réalité. Comme il n'y avait pas de spéculation sous les hypothèses utilisées dans l'analyse théorique, nous porterons une attention toute particulière à ce thème dans l'analyse des résultats expérimentaux.

Suite à la vente aux enchères de bien A, les sujets doivent dans un deuxième temps choisir la quantité de technologie propre. Pour la même raison que mentionné précédemment, nous désignons la technologie propre sous le nom de bien B. En période 1, le prix du bien B est fixe et dépend de la catégorie du sujet. Les sujets plus expérimentés peuvent se procurer la technologie propre à un prix inférieur par rapport aux sujets moins expérimentés. La distribution du prix du bien B est connaissance commune. Cependant, les sujets ne savent pas le prix exact du bien B pour les sujets de l'autre catégorie. Enfin, le prix du bien B en période 2 dépend des choix en période 1. Plus les sujets produisent avec la technologie propre en période

---

<sup>12</sup> Notons que pour la première session du traitement 2, nous avons seulement 12 sujets.

<sup>13</sup> Pour la première session du traitement 2, nous avons seulement 2 groupes de 6 sujets.



1, moins le prix de cette technologie est élevé en période 2. Les sujets trouvent sur leur feuille de jeu un tableau leur indiquant le prix de la technologie propre en période 2 selon leur production avec cette technologie en période 1. Cette feuille de jeu diffère selon le traitement.

Par ailleurs, le niveau de production d'un sujet pour la période est déterminé en additionnant la quantité de permis d'émission et de technologie propre qu'il a utilisée au cours de la période. Ce niveau de production détermine les revenus de la firme. Les sujets retrouvent une table des revenus selon le niveau de production dans leur feuille de jeu. Ils doivent donc considérer leur niveau de production lorsqu'ils font leurs choix en termes de quantité de permis d'émission et de technologie propre. À la fin de la période, les sujets reçoivent un sommaire de leurs décisions et de leur profit pour la période. On répète cette procédure deux fois au cours d'une ronde. À la fin de chaque ronde, les sujets reçoivent un sommaire de leurs décisions et de leur profit pour la ronde. Ils peuvent ainsi ajuster leur comportement au fil des rondes. Lors de l'analyse des résultats, nous tenterons de déterminer s'il y a effectivement eu ajustement du comportement.

Au total, une session comporte 6 rondes, ainsi qu'une ronde de pratique. Cette dernière a pour but de permettre aux sujets de se familiariser avec le logiciel sans pénalité. Conséquemment, les profits récoltés lors de cette ronde ne sont pas tenus en compte dans le paiement final. De plus, pour s'assurer que les sujets comprennent bien le jeu, nous leur faisons faire des exercices écrits sur différentes stratégies avant la ronde de pratique.<sup>14</sup> Enfin, à la fin de la session, nous invitons les sujets à remplir un questionnaire sur leur niveau de compréhension et leurs caractéristiques socio-démographiques.

Par ailleurs, les sujets seront recrutés à partir de la banque de sujets du Laboratoire Universitaire Bell (LUB-C3E), majoritairement constituée d'étudiants universitaires entre 20 et 30 ans de tous sexes. Il n'y aura pas de critère d'exclusion, sauf celui de la disponibilité. Pour assurer la confidentialité, un numéro sera attribué à chaque poste de travail informatique. Une fois les sujets rémunérés, nous détruirons les liens entre les numéros et les renseignements personnels sur les individus. Ainsi, l'analyse des données, que nous retrouvons à la section suivante, se fera anonymement.

---

<sup>14</sup> Ce questionnaire se trouve à l'Annexe II.

## 6. Analyse des résultats expérimentaux

Regardons maintenant les résultats obtenus suite à l'expérience. Notons que, de façon générale, il n'y a pas de différence notable entre les deux sessions d'un même traitement. Ainsi, nous présenterons et analyserons les résultats pour chacun des traitements sans distinction selon la session. Rappelons qu'il y a trois traitements se différenciant selon que le coût initial de la technologie propre soit relativement faible (traitement 1), moyen (traitement 2) ou élevé (traitement 3). Dans les pages qui suivront, nous nous intéresserons dans un premier temps au niveau d'efficacité atteint. Ensuite, nous nous intéresserons aux quantités de permis d'émission et de technologie propre utilisées dans la production. Enfin, nous nous pencherons sur le mécanisme de vente aux enchères des permis d'émission.

### 6.1 Efficacité

Tout d'abord, nous définissons ici le concept d'efficacité comme la proportion de la somme des profits obtenus par l'ensemble des firmes par rapport au profit social maximal. Notons que ce profit maximal concorde avec l'équilibre sous PÉÉ obtenu lors de la simulation. Sur l'ensemble des traitements, les sujets ont atteint un niveau d'efficacité moyen de 88%. Ce niveau est inférieur à celui obtenu par d'autres chercheurs dans le passé (entre autres Plott (1983)) qui ont également réalisé des expériences avec des permis d'émission échangeables, mais sans tenir en compte l'apprentissage par expérience. Ainsi, en complexifiant le jeu, on diminue le niveau d'efficacité. Évidemment, les sujets ne sont pas des dirigeants d'entreprises, mais ces résultats portent à croire que les PÉÉ pourraient ne pas être aussi efficaces en pratique. En effet, en tenant compte de l'apprentissage par expérience dans l'utilisation de la technologie propre, on complexifie les décisions à prendre, et une

période d'adaptation peut être nécessaire avant d'atteindre l'équilibre. Nous vérifierons donc la présence d'amélioration lorsque l'on avance dans le jeu.

Par ailleurs, mentionnons que la somme des profits obtenus par l'ensemble des firmes est inférieure à ce que l'on obtient pour CC dans les résultats simulés. Les résultats expérimentaux infirment donc l'hypothèse 1a). Celle-ci stipule que les profits totaux sont plus élevés sous PÉÉ que sous CC. Au niveau individuel, PÉÉ permet d'obtenir des profits plus élevés dans près de la moitié des cas, tant pour les firmes plus et moins expérimentées, sans différence notable entre les traitements. Ainsi, l'hypothèse 1 b) selon laquelle les PÉÉ permettent aux firmes d'obtenir individuellement des profits plus élevés que CC n'est pas validée. Le fait que l'hypothèse 1 a) et b) ne soit pas validée est surprenant, puisque, habituellement, l'efficacité est considérée comme le principal avantage des PÉÉ. Il faudrait réaliser l'expérience avec CC afin de vérifier si, avec un choix plus simple, les sujets parviennent à amasser plus de profits. Voyons maintenant plus en détail les particularités du niveau d'efficacité pour chacun des traitements.

Le tableau 4 et le graphique 1 montrent les niveaux d'efficacité atteints par ronde selon les traitements (T1, T2, T3). Notons que, avec un coût de la technologie propre élevé, le niveau d'efficacité atteint est significativement plus bas qu'avec un coût de la technologie faible ou moyen à un seuil de 10%. Cela s'explique par des gains possibles à l'échange plus élevés avec un coût de la technologie propre plus élevé. En conséquence, si les sujets ne jouent pas l'optimum lors de l'échange de permis d'émission, ils perdent davantage en gains à l'échange non réalisés. Ceci diminue le taux d'efficacité. Dans cet ordre d'idée, une explication possible serait que l'hypothèse 2a) n'est pas validée par les résultats expérimentaux. Dans les sections suivantes, nous tenterons de déterminer quels sont les facteurs qui ont fait en sorte que les sujets n'adoptent pas un comportement optimal.

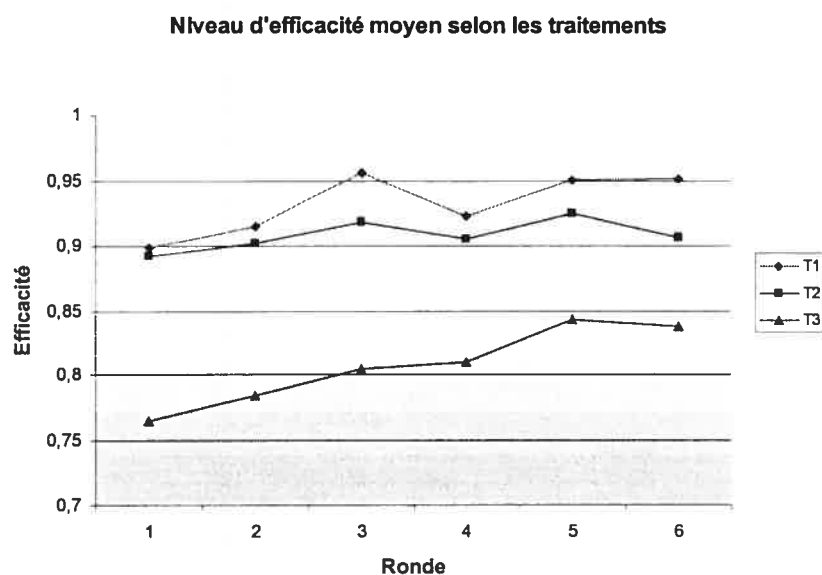
**Tableau 4- Efficacité selon les traitements**

Traitement	1 (coût faible)	2 (coût moyen)	3 (coût élevé)
Moyenne	0,932	0,909	0,807
Écart-type	0,036	0,020	0,038

Par ailleurs, dans le graphique 1, nous remarquons que le niveau d'efficacité est assez élevé dès les premières rondes du jeu, sauf pour le traitement 3. Ceci

concorde avec les résultats expérimentaux de Ben-David et al (1999). Ils avaient trouvé un niveau d'efficacité plus bas pour une plus grande hétérogénéité des coûts. Par ailleurs, traitement 3, on remarque une augmentation dans le niveau d'efficacité au fil des rondes. Plus précisément, les sujets augmentent en moyenne leur niveau d'efficacité de plus de 1,5 point de pourcentage à chaque ronde, et le passage des rondes explique plus de 90% de la variation du niveau d'efficacité. Ceci peut s'expliquer par une meilleure compréhension des sujets au fur et à mesure qu'ils progressent dans l'expérience. Ainsi, ils réajustent leur comportement au fil des rondes, ce qui élève le niveau d'efficacité.

**Graphique 1**



Source : Excel

En somme, contrairement à ce que l'on attendait, la somme des profits obtenus est inférieure à celle obtenue sous CC par simulation. Ceci peut s'expliquer, entre autres, par un plus grand niveau de complexité du jeu. Une autre explication possible du faible taux d'efficacité serait que la prise en compte de l'apprentissage par expérience incite les sujets moins expérimentés à produire avec la technologie propre, alors qu'ils auraient avantage à utiliser des permis d'émission. Les gains à l'échange ne seraient donc pas tous exploités, limitant de ce fait les profits et le taux d'efficacité. En conséquence, les PÉÉ perdraient de leur attrait comme instrument de régulation des émissions. Dans la section suivante, nous analyserons les causes du

faible taux d'efficacité en se penchant sur les quantités de permis d'émission et de technologie propre utilisées par les sujets.

## 6.2. Quantités choisies

Dans cette section, nous tenterons de déterminer si les sujets ont adopté un comportement optimal en termes de quantités au cours de l'expérience. Dans un premier temps, nous regarderons les quantités moyennes, puis nous regarderons la proportion des sujets ayant choisis les quantités d'équilibre sous PÉÉ. De plus, nous distinguerons les résultats selon les traitements. Tout d'abord, regardons les valeurs moyennes de permis d'émission (A) et de technologie propre (B) utilisées chaque période, ainsi que les quantités produites (Q). Nous tenterons ainsi de confirmer ou d'infirmer les hypothèses 2 à 4. Nous présenterons les résultats pour le regroupement de toutes les rondes d'un même traitement, puisqu'il n'y a pas d'évolution notable dans les quantités moyennes au cours du jeu.<sup>15</sup> Nous comparerons donc ces quantités moyennes aux quantités d'équilibre sous PÉÉ. Rappelons que, à l'équilibre, les quantités sont les mêmes à la période 1 et 2, sauf dans le traitement 2 sous CC pour les firmes moins expérimentées. Nous retrouvons ces quantités d'équilibre au bas des tableaux 5 à 7 pour faciliter la comparaison entre résultats expérimentaux et théoriques.

### a) Traitement 1

Dans le tableau 5, on remarque que les sujets ont, en moyenne, adopté un comportement beaucoup plus près des résultats simulés pour CC que des résultats simulés sous PÉÉ. Ceci est assez surprenant. Il en découle que, en moyenne, les sujets n'ont pas suffisamment su tirer profit des échanges de permis d'émission pour un faible coût de la technologie propre. Ainsi, les résultats expérimentaux infirment l'hypothèse 2 (a et b). Cette hypothèse stipule que les sujets plus expérimentés vendent leur permis d'émission aux sujets moins expérimentés pour ne produire qu'avec la technologie propre. De plus, les firmes moins expérimentées produisent utilisent plus de technologie propre sous PÉÉ que sous CC. Ceci infirme l'hypothèse 3 b) selon laquelle les firmes moins expérimentées utilisent moins la technologie

---

<sup>15</sup> Il y a parfois évolution, celle-ci demeure très faible et on ne sait pas vers quelles valeurs elles convergent. Notons néanmoins une réduction de l'écart-type au fil des rondes, ce qui laisse deviner un comportement plus uniforme lorsque les sujets connaissent davantage le jeu.

propre sous PÉÉ que sous CC. Enfin, puisque le comportement expérimental avec les PÉÉ s'approche beaucoup du comportement simulé avec CC, on ne peut distinguer la méthode de régulation à favoriser pour le régulateur.<sup>16</sup> Cependant, comme nous le verrons dans les tableaux 6 et 7, ce phénomène s'estompe pour des coûts initiaux moyens et élevés de la technologie propre. On peut néanmoins se demander s'il vaut la peine d'administrer une vente aux enchères de permis d'émission si les joueurs jouent CC de toute façon.

**Tableau 5 – Quantités moyennes choisies dans le traitement 1**

	Sujets plus expérimentés			Sujets moins expérimentés		
	A	B	Q	A	B	Q
Période 1	0,94	2,16	3,09	1,05	2,05	3,09
Période 2	0,98	2,22	3,20	1,04	2,06	3,09
Avec PÉÉ	0	3	3	2	1	3
Avec CC	1	2	3	1	2	3

#### b) Traitement 2

Dans le tableau 6, on remarque que les sujets plus expérimentés ont choisi, en moyenne, une quantité produite près du niveau d'équilibre. Cependant, en moyenne, ils n'ont pas choisi la méthode de production optimale. En effet, ils ont utilisé en moyenne des quantités de permis d'émission et de technologie propre intermédiaires entre les quantités obtenues par simulation avec les PÉÉ et CC. On demeure tout de même plus près de l'équilibre sous CC que PÉÉ. Il néanmoins faudrait analyser la fréquence des résultats pour déterminer quel comportement a été le plus souvent adopté. Pour leur part, les sujets moins expérimentés ont choisi en moyenne un niveau de production plus élevé que le niveau d'équilibre sous PÉÉ. Par ailleurs, le comportement des joueurs moins expérimentés ne semble pas en lien avec les résultats simulés pour CC, puisqu'on ne retrouve pas l'augmentation dans les quantités de technologie propre et produites entre la période 1 et la période 2. Enfin, les sujets moins expérimentés ont utilisé une quantité de permis d'émission inférieure à la quantité d'équilibre. Ainsi, la surproduction par rapport à l'équilibre résulte d'une utilisation trop élevée de la technologie propre.

<sup>16</sup> Rappelons que dans les résultats simulés, nous avons trouvé qu'il n'y avait pas de différence en termes de structure du marché et d'investissement total dans la technologie entre PÉÉ et CC. Ainsi, le régulateur devait favoriser PÉÉ sur la base de profits plus élevés pour les firmes.

**Tableau 6 – Quantités moyennes choisies dans le traitement 2**

	Sujets plus expérimentés			Sujets moins expérimentés		
	A	B	Q	A	B	Q
Période 1	0,64	2,39	3,03	1,36	1,43	2,79
Période 2	0,68	2,43	3,11	1,32	1,40	2,72
Avec PÉÉ	0	3	3	2	0	2
Avec CC	1	2	3	1	1	2
				1	2	3

Dans l'ensemble, même s'il y a une amélioration par rapport au traitement 1, les sujets ne profitent pas suffisamment des gains à l'échange. En conséquence, l'hypothèse 2 (a et b) demeure infirmée par les résultats expérimentaux. De plus, il semble que les sujets moins expérimentés aient voulu profiter des gains liés à l'apprentissage par expérience, soit la réduction du coût de la technologie propre suite à l'utilisation de cette technologie. En effet, cela pourrait expliquer pourquoi ils ont utilisé une quantité de technologie supérieure à la quantité d'équilibre. Ceci infirme l'hypothèse 3 a). Cette hypothèse stipule que les sujets moins expérimentés n'utilisent pas la technologie propre, sauf pour le traitement 1. De même, l'hypothèse 3 b) selon laquelle sous PÉÉ les sujets moins expérimentés utilisent moins la technologie propre que sous CC est infirmée. Cette sur-utilisation de la technologie propre a pour effet d'augmenter la production au-delà du niveau optimal. Ainsi, l'hypothèse 4 a) ne se confirme que faiblement dans les résultats expérimentaux. Cette hypothèse stipule que les quantités totales produites et de technologie propre diminuent lorsque le coût de la technologie propre augmente. De plus, la surproduction des sujets moins expérimentés diminue l'asymétrie de la structure du marché par rapport à ce que l'on attendait. En conséquence, les résultats expérimentaux ne valident que faiblement l'hypothèse 4 b) d'asymétrie de la structure du marché. En fait, l'asymétrie de la structure du marché est maintenant inférieure sous PÉÉ que sous CC, ce qui infirme l'hypothèse 4 c).

Enfin, du point de vue du régulateur, nous avons trouvé dans les résultats simulés que PÉÉ devraient être privilégiés sous un critère de maximisation des profits, mais que CC devrait être privilégié sous les critères d'investissement en technologie propre et de symétrie de la structure du marché. Pour leur part, les résultats expérimentaux donnent un avantage à CC en termes de profits. De plus, CC conserve son avantage en termes d'investissement dans la technologie propre, mais

dans une mesure inférieure que ce qu'on avait prévu. En revanche, les PÉÉ se comporte un léger avantage en termes de structure du marché. Regardons maintenant les résultats pour un coût de la technologie propre élevé.

### c) Traitement 3

Dans le tableau 7, on remarque que le comportement des sujets s'éloigne davantage du comportement avec CC. Néanmoins, encore une fois, les sujets ne profitent pas suffisamment des gains à l'échange. En conséquence, l'hypothèse 2 (a et b) demeure infirmée par les résultats expérimentaux. De plus, les sujets moins expérimentés ont encore utilisé une quantité de technologie propre supérieure à la quantité d'équilibre et à la quantité sous CC. Ceci infirme l'hypothèse 3 (a et b). Par ailleurs, les sujets plus expérimentés ont produit en moyenne une quantité supérieure à la quantité d'équilibre. Ces deux caractéristiques impliquent que les résultats expérimentaux confirment l'hypothèse 4a), mais plus faiblement que ce que l'on attendait. Cependant, la surproduction des sujets plus expérimentés crée une asymétrie dans la structure de marché. Ainsi, les résultats expérimentaux ne confirment pas l'hypothèse 4 b). Néanmoins, cette asymétrie demeure inférieure à celle sous CC. Ainsi, les résultats concordent avec l'hypothèse 4c).

**Tableau 7 – Quantités moyennes choisies dans le traitement 3**

Traitement 1	Sujets plus expérimentés			Sujets moins expérimentés		
	A	B	Q	A	B	Q
Période 1	0,71	1,73	2,44	1,29	0,71	2
Période 2	0,62	1,88	2,5	1,38	0,87	2,25
Avec PÉÉ	0	2	2	2	0	2
Avec CC	1	1	2	1	0	1

Enfin, du point de vue du régulateur, nous avons trouvé dans les résultats simulés que PÉÉ devraient être privilégiés selon les trois critères d'évaluation utilisés. Les résultats expérimentaux ne confirment pas cette conclusion. En effet, les profits obtenus dans la simulation de CC sont supérieurs à ceux obtenus expérimentalement avec les PÉÉ. Néanmoins, les résultats expérimentaux confirment les avantages des PÉÉ pour les deux autres critères, et ce même s'il y a une asymétrie imprévue dans la structure du marché. Effectivement, puisque l'asymétrie demeure plus prononcée sous CC que sous PÉÉ.

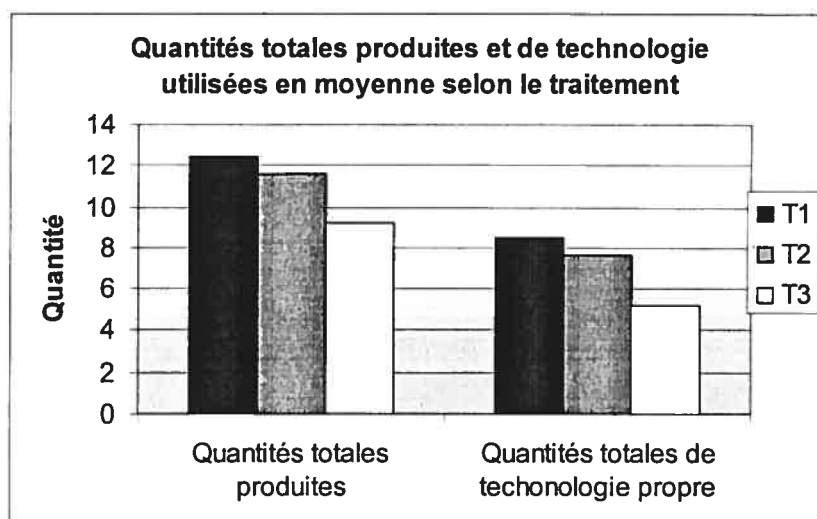


#### d) Conclusion

Globalement, on remarque que les sujets ont adapté leur comportement aux divers traitements. En effet, ils ont opté pour des stratégies différentes, en moyenne, selon que les coûts de la technologie soient faibles, moyens ou élevés. Dans tous les cas, ont obtenu des performances plus faibles que prévu en termes d'efficacité. Ainsi, les résultats expérimentaux infirment l'hypothèse 1 (a et b) selon laquelle les PÉÉ permettent d'atteindre des profits individuels et totaux plus élevés que CC. Ceci résulte du fait que les sujets n'ont pas su profiter suffisamment des gains à l'échange. De ce fait, l'hypothèse 2 (a et b) est infirmée. Celle-ci stipule que les firmes plus expérimentées vendent leur permis d'émission aux firmes moins expérimentées et que les firmes plus expérimentées n'utilisent que la technologie propre pour produire. Dû à la non viabilité de l'hypothèse 2, les sujets moins expérimentés n'achètent pas suffisamment de permis d'émission et ils doivent produire à l'aide de la technologie propre. Ceci infirme l'hypothèse 3 a) selon laquelle les firmes moins expérimentées n'utilisent pas la technologie propre, sauf dans lorsque le coût initial de la technologie est relativement faible. De plus, sauf pour le traitement 2, les firmes moins expérimentées utilisent davantage la technologie propre sous PÉÉ que sous CC. Ceci infirme l'hypothèse 3 b). Notons que cette sur-utilisation de la technologie propre s'accorde avec les résultats obtenus par Gangadharan et al (2003).

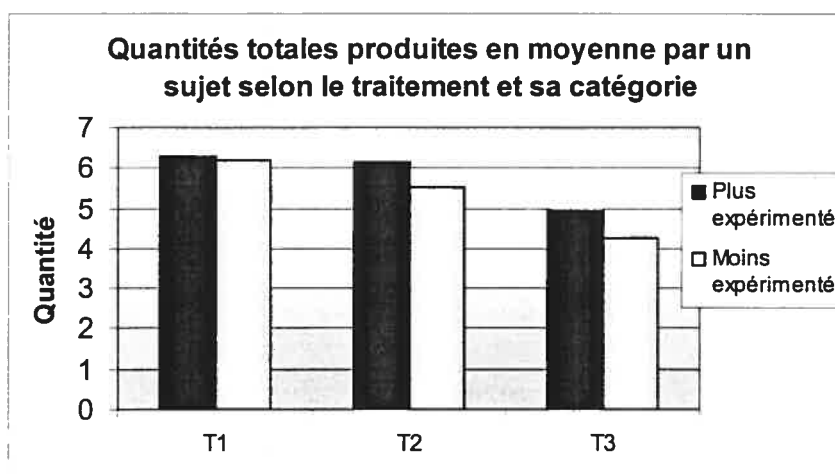
Par ailleurs, le graphique 2 montre que l'hypothèse 4 a) est confirmée dans les résultats expérimentaux. Cette hypothèse stipule que les quantités totales produites et les quantités totales de technologie propre diminuent lorsque le coût initial de la technologie propre augmente. On remarque qu'il y a en effet une diminution de ces quantités lorsqu'on passe du traitement 1, avec faible coût initial de la technologie propre, au traitement 3, avec coût initial élevé de la technologie propre. Par ailleurs, le graphique 3 montre que les résultats expérimentaux ne confirment pas l'hypothèse 4 b). Cette hypothèse stipule que la structure du marché n'est asymétrique que pour un coût initial moyen. Or, le graphique 3 montre une asymétrie dans les quantités produites selon la catégorie de sujet pour les traitements 2 et 3. Enfin, nos résultats infirment l'hypothèse 4 c) selon laquelle la structure du marché est plus symétrique sous CC que PÉÉ uniquement dans le traitement 2. En effet, dans les résultats expérimentaux, avec les PÉÉ, la structure du marché est également ou plus symétrique à celle sous CC, et ce pour tous les traitements.

Graphique 2



Source : Excel

Graphique 3

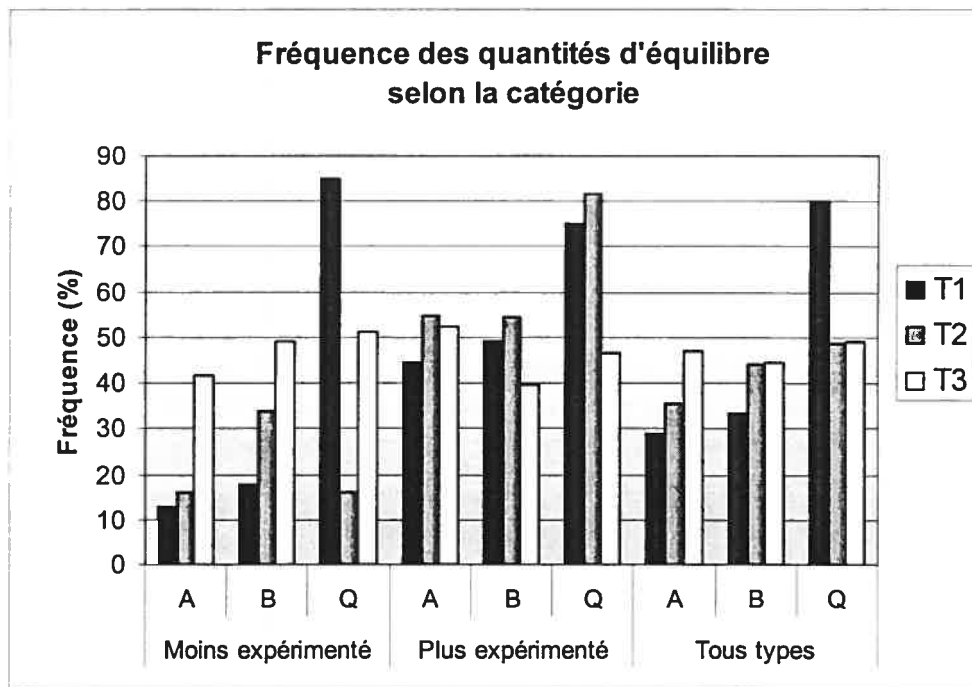


Source : Excel

Jusqu'à présent, notre analyse nous a montré que les sujets n'ont pas, en moyenne, adopté les comportements qu'on attendait. Cependant, ceci ne révèle pas la distribution des choix. Dans cet ordre d'idées, le graphique 4 illustre la fréquence des choix optimaux selon le type d'individu et le traitement. Nous ne distinguons pas selon la période et la ronde, puisqu'il n'y a pas de différence notable dans la fréquence des choix optimaux selon la période, ni la ronde. On remarque que, sauf pour la quantité totale dans le traitement 1, moins d'un sujet sur deux choisit la quantité d'équilibre, tous types confondus. Ceci explique pourquoi les quantités choisies en moyenne diffèrent souvent de celles qu'on attendait. De même, ceci explique le faible niveau d'efficacité atteint. Par ailleurs, bien que cela ne soit pas

représenté sur le graphique, notons que la fréquence des quantités optimales comporte une légère tendance à la hausse au fil des périodes. Ceci dénote un certain apprentissage chez les sujets.

**Graphique 4**



Source : Excel

Finalement, le tableau 8 rapporte l'instrument de régulation à privilégier selon chacun des critères pour chaque traitement, selon que l'on considère les résultats simulés ou expérimentaux. Ainsi, du point de vue du régulateur, contrairement à ce que l'on attendait suite à la simulation, les PÉÉ comporte un avantage par rapport CC en termes d'investissements dans la technologie propre, et ce pour tous les traitements. Ceci est dû au fait que les sujets ont choisi une quantité totale de technologie propre égale ou supérieure aux résultats simulés dans chacun des traitements. En particulier, ce sont les sujets moins expérimentés qui ont sur-utilisé la technologie propre. Ils ont ainsi augmenté leur niveau global de production. En conséquence, l'asymétrie de la structure du marché est moindre que prévue. Par le fait même, PÉÉ ne comporte pas de désavantage par rapport à CC en termes de symétrie du marché. Cependant, il faut cependant faire attention à l'argument traditionnel d'efficacité, car les sujets ne sont pas parvenus pas à tirer tous les gains

possibles de l'échange. Ainsi, dans les résultats expérimentaux, le niveau de profits atteint est inférieur à celui simulé sous CC. Afin de mieux comprendre pourquoi, regardons plus en profondeur les résultats obtenus lors de la vente aux enchères de permis d'émission.

**Tableau 8 – Instrument de régulation à privilégier selon le critère**

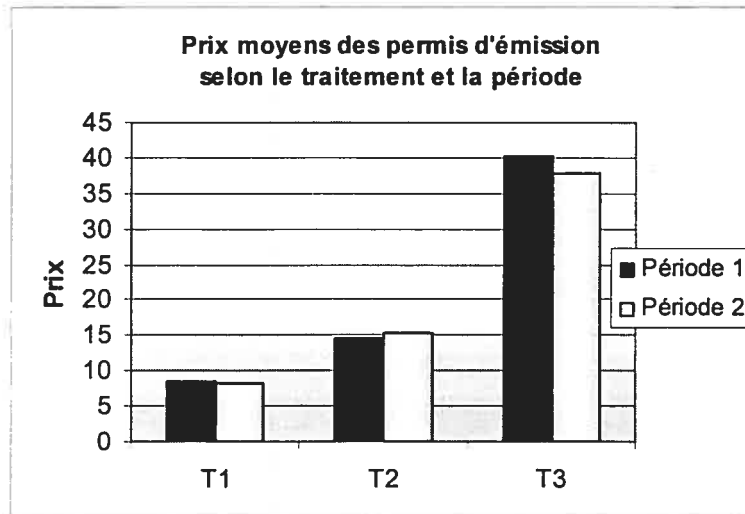
Critères :	Profits	Investissements	Symétrie du marché
Expérimentation			
Traitement 1	CC	PÉE (faiblement)	=
Traitement 2	CC	PÉE	PÉE
Traitement 3	CC	PÉE	PÉE
Simulation			
Traitement 1	PÉE	=	=
Traitement 2	PÉE	CC	CC
Traitement 3	PÉE	PÉE	PÉE

### 6.3. Vente aux enchères

Dans cette section de l'analyse des résultats, nous nous attarderons sur les prix d'échange, puis nous regarderons le nombre d'échanges afin de déceler la présence de spéculation au cours de la vente aux enchères. Notons d'abord que les écarts-types des prix diminuent avec le temps. Ainsi, les prix convergent davantage lorsque les sujets ont pu adapter leur comportement.

Le graphique 5 montre les prix moyens selon le traitement et la période. D'abord, notons que les prix des permis d'émission se situent dans l'intervalle prévu lors de la simulation, sauf pour le traitement 1. En effet, dans ce cas, les prix dépassent ceux qu'on attendait. On remarque aussi que les prix en période 2 ne sont pas, ou que très légèrement, inférieurs aux prix en période 1. Nous nous attendions à une différence plus marquée. Une explication possible est que les sujets ont considéré un impact moyen sur les deux périodes plutôt que l'impact marginal d'un permis d'émission. Enfin, comme on s'y attendait, le prix des permis augmente avec le coût initial de la technologie propre.

Graphique 5



Source : Excel

Lorsque nous avons simulé les résultats théoriques, sous nos hypothèses, il n'y avait pas de spéculation. Nous tenterons ici de déceler la présence de spéculation dans les différents traitements. Notons que, si on avait interdit la spéculation et, de ce fait, obligé chaque sujet à n'être que vendeur ou acheteur, il y aurait eu au plus 18 échanges par ronde. Or, en moyenne, il y a eu 31,9 échanges par ronde, ce qui est nettement supérieur. On remarque que le nombre d'échanges moyen par ronde est similaire parmi toutes les sessions, sauf une session du traitement 1 pour laquelle la moyenne est supérieure à 60 échanges. En excluant cette session, le nombre moyen d'échanges tombe à 26,1. Néanmoins, on retrouve la spéculation dans tous les cas. Notons que les sujets ont spéculé davantage lorsque le prix des permis est plus bas et, donc, lorsque l'effet sur les profits est moins important. La forte spéculation dans le traitement 1 pourrait expliquer pourquoi les prix obtenus dépassent largement les prix attendus. Il pourrait en effet s'agir d'une bulle spéculative.

En résumé, les résultats confirment la présence de spéculation dans la vente aux enchères de permis d'émission. Ceci permettrait d'expliquer pourquoi les prix des permis d'émission ne se situent pas l'intervalle attendu pour le traitement 1. La spéculation permettrait aussi d'expliquer une partie des différences entre les résultats expérimentaux et les résultats à l'optimum en termes de quantités choisies. En effet, si le signal de prix s'avère erroné, alors le comportement optimal en théorie peut différer du comportement optimal en pratique. Afin de limiter les impacts sur

l'efficacité, le régulateur pourrait interdire la spéculation, c'est-à-dire obliger chaque firme à être soit uniquement acheteur, soit uniquement vendeur.

## 7. Conclusion

Cette recherche avait pour objectif de déterminer les impacts de l'apprentissage par expérience sur la désirabilité des permis d'émission échangeables. Nous avons comparé cette méthode de régulation à celle de la norme (CC). Pour ce faire, nous avons utilisé trois critères d'évaluation, soit le niveau de profits des firmes, les investissements en technologie propre et la structure du marché.

Dans un premier temps, nous avons simulé les résultats numériques pour les modèles permanents et transitoires selon différents prix de vente, fonctions de coûts de production et coûts initiaux de la technologie propre. Nous avons trouvé qu'essentiellement, seul le coût initial de la technologie propre relativement au prix de vente et au coût de production influe sur la nature des résultats. Nous avons distingué ces résultats selon trois cas : coût initial de la technologie propre relativement faible, moyen ou élevé. De plus, nous avons obtenus des résultats similaires pour les deux types de modèles, mais pour des coûts initiaux relatifs de la technologie propre plus élevés dans le modèle transitoire.

Dans un deuxième temps, nous avons réalisé une série d'expériences en laboratoire pour tester les conclusions de l'analyse théorique. Pour l'expérimentation, nous avons utilisé le modèle permanent sous PÉÉ. Nous avons fait trois traitements avec qui se distinguent selon que le coût initial de la technologie propre relativement faible, moyen ou élevé. Ceci nous a permis de trouver des différences entre les résultats théoriques et expérimentaux, ainsi que de tirer quelques conclusions.

Premièrement, lors de la simulation, nous avons trouvé que les PÉÉ permettent aux deux types de firmes (plus expérimentées et moins expérimentées) d'obtenir des profits plus élevés que CC. Ceci repose sur le fait que les firmes peuvent profiter des gains à l'échange sous PÉÉ. Ainsi, les firmes plus expérimentées vendent leur permis d'émission aux firmes moins expérimentées et ne

produisent qu'avec la technologie propre. Cependant, les résultats expérimentaux montrent que, dans tous les cas, les sujets n'ont pas su profiter suffisamment des gains à l'échange. Ainsi, les profits simulés sous CC sont supérieurs à ceux obtenus expérimentalement avec PÉÉ. De ce fait, l'argument traditionnel de l'efficacité en faveur des PÉÉ n'est pas nécessairement applicable lorsqu'on complexifie la tâche à exécuter.

Deuxièmement, les résultats simulés montrent que PÉÉ favorise moins l'investissement que CC pour un coût initial de la technologie propre relativement moyen. De plus, nous avons trouvé que sous PÉÉ, les firmes moins expérimentées n'utilisent pas la technologie propre, sauf si son coût initial est relativement faible. On ne retrouve pas ces résultats en laboratoire. En effet, dans tous les traitements expérimentaux, les firmes moins expérimentées utilisent une quantité moyenne de technologie propre non nulle. En conséquence, les PÉÉ comportent un avantage sur CC en termes d'investissement en technologie propre dans les résultats expérimentaux.

Troisièmement, lors de la simulation, nous avons trouvé que les effets sur la structure du marché dépendent du coût relatif de la technologie propre. De ce fait, on ne peut pas déterminer le meilleur instrument selon ce critère. Néanmoins, il se dégage que les quantités totales produites diminuent lorsque le coût relatif initial de la technologie propre augmente, et ce tant pour PÉÉ que CC. Ceci résulte de la diminution de la production avec technologie propre par les deux types de firmes lorsque son coût augmente. Les résultats expérimentaux confirment ces deux tendances. Enfin, mentionnons que, sous PÉÉ, les résultats simulés montrent une asymétrie de la structure du marché uniquement pour un coût initial relatif moyen de la technologie propre. Dans ce cas, les firmes plus expérimentées produisent plus que les firmes moins expérimentées. Notons que cette asymétrie est plus prononcée sous PÉÉ que sous CC. En revanche, dans les résultats expérimentaux, nous avons trouvé que l'asymétrie est inférieure sous PÉÉ que CC. De plus, nous avons trouvé une asymétrie dans la structure du marché pour un coût relatif de la technologie propre élevé dans les données expérimentales. Cependant, cette asymétrie demeure inférieure à l'asymétrie sous CC. Ainsi, dans les données expérimentales, les PÉÉ présente une toujours une asymétrie de la structure du marché égale ou moindre à celle simulée avec CC.



Finalement, les résultats expérimentaux révèlent la présence de spéculation lors de la vente aux enchères de permis d'émission. Ainsi, l'expérimentation nous a permis de découvrir un aspect que les résultats théoriques ne prévoyaient pas. Cette spéculation se répercute dans les prix des permis d'émission, particulièrement pour un coût initial de la technologie relativement faible. De plus, si le signal de prix est erroné, alors les équilibres théoriques ne concordent plus nécessairement avec les équilibres en pratique. Ceci permettrait aussi d'expliquer une partie des différences entre les résultats expérimentaux et les résultats d'équilibre. En conséquence, afin de limiter les impacts négatifs sur l'efficacité, le régulateur pourrait interdire la spéculation, c'est-à-dire obliger chaque firme à être soit uniquement acheteur, soit uniquement vendeur.

Pour conclure, du point de vue du régulateur, ni l'analyse théorique, ni l'analyse des résultats expérimentaux ne permet pas la détermination de l'instrument à privilégier. En effet, le choix dépend de l'importance relative accordée à chacun des critères d'évaluation, soient le niveau de profits, l'investissement dans la technologie propre et la structure du marché. Mentionnons néanmoins que, sous le seul critère traditionnel d'efficacité, l'instrument à favoriser selon nos résultats expérimentaux ne serait pas les PÉÉ, mais bien CC. En conséquence, il faut faire attention à l'argument traditionnel d'efficacité en faveur des PÉÉ lorsqu'on complexifie les modèles. Il faut cependant faire attention avec les conclusions de cette étude. En effet, on a comparé les résultats expérimentaux pour les PÉÉ avec les résultats simulés pour CC. Il faudrait réaliser l'expérimentation sous CC pour s'assurer de la viabilité de nos conclusions.

Dans un autre ordre d'idée, il serait intéressant d'inclure l'extension de l'apprentissage par expérience à toutes les firmes (« spillover ») dans des expériences ultérieures. En effet, avec le déplacement de la main-d'œuvre, l'imitation et l'échange des procédés industriels, il y a une partie de l'apprentissage par expérience qui profite à toutes les firmes. Ainsi, il y a une externalité positive à l'utilisation de la technologie. Ceci mène à une utilisation privée de la technologie propre inférieure au niveau socialement optimal. Il serait intéressant de voir comment réagissent les sujets face à cette situation. De même, il serait intéressant d'ajouter de l'incertitude au niveau de la réduction des coûts liée à l'apprentissage par expérience. En effet, nous avons supposé que les firmes avaient une connaissance parfaite des impacts de

l'apprentissage par expérience sur le coût de la technologie. Il s'agit d'une hypothèse très peu plausible. Néanmoins, le défi pour la réalisation de ces expériences consiste à garder le jeu suffisamment simple pour que les sujets le comprennent.

## Bibliographie

- [1] Kenneth J. Arrow. The economic implications of learning by doing. *The Review of Economic Studies*, 29(3) :155–173, June 1962.
- [2] Shaul Ben-David, David S. Brookshire, Stuart Burness, Michael McKee, and Christian Schmidt. Heterogeneity, irreversible production choices, and efficiency in emission permit markets. *Journal of Environmental Economics and Management*, 38(2) :176–194, 1999.
- [3] Timothy N. Cason and Lata Gangadharan. Transaction costs in tradable permit markets : An experimental study of pollution market designs. *Journal of Regulatory Economics*, 23(2) :145–165, 2003.
- [4] J. H. Dales. *Pollution, Property and Prices, An Essay in Policy Making and Economics*. University of Toronto Press, Toronto, 1968.
- [5] Douglas D. Davis and Charles A. Holt. *Experimental Economics*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA, 1993.
- [6] Urs Fischbacher. Z-tree - zurich toolbox for readymade economic experiments - experimenter's manual. Working paper, Institute for Empirical Research in Economics, University of Zurich, 1999.
- [7] Lata Gangadharan, Alex Farrell, and Rachel Croson. Investment decisions and emissions reductions : Results from experiments in emissions trading, 2005. Working Paper.
- [8] Rob Godby, Stuart Mestelman, R. Andrew Muller, and Douglas Welland. Emissions trading with shares and coupons when control over discharges is uncertain. *Journal of Environmental Economics and Management*, 32 :359–381, 1997.

- [9] L.H. Goulder and K. Mathai. Optimal co2 abatement in the presence of induced technological change. *Journal of Environmental Economics and Management*, 39 :1–38, 2000.
- [10] John H. Kagel and Alvin E. Roth. *The Handbook of Experimental Economics*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA, 1995.
- [11] W. David Montgomery. Markets in licenses and efficient pollution control programs. *Journal of Economic Theory*, 5 :395–418, 1972.
- [12] R. Andrew Muller, Stuart Mestelman, John Spraggon, and Rob Godby. Can double auctions control monopoly and monopsony power in emissions trading markets? *Journal of Environmental Economics and Management*, 44 :70–92, 2002.
- [13] Charles R. Plott. Externalities and corrective policies in experimental markets. *The Economic Journal*, 93(369) :106–127, 1983.
- [14] Nic Rivers and Mark Jaccard. Choice of environmental policy in the presence of learning by doing. *Energy Economics*, 28 :223–242, 2006.
- [15] Nations Unies. Protocole de kyoto à la convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques, 1998.

## Annexes

### Annexe I- Instructions

Note : Les instructions diffèrent selon les traitements uniquement par le taux de conversion en dollars canadiens et le nombre initial d'UME alloués. Les instructions qui suivent sont pour le traitement 1.

#### Introduction

Nous vous remercions de votre participation à l'expérience qui débutera dans quelques instants. En réfléchissant bien aux décisions que vous prenez tout au long de cette expérience, vous pouvez gagner un montant d'argent substantiel.

##### *Résumé de l'expérience*

Durant l'expérience, vous participerez à 7 rondes, soit une ronde de pratique et six réelles. Chaque ronde est composée de 2 périodes. À chaque période, vous devez vous procurer des biens; le bien A et le bien B. Plus précisément, vous participez à une vente aux enchères pour les biens A, puis vous pouvez acheter des biens B. L'achat de ces biens (A et B) est la source de vos revenus. Ils sont exprimés en « Unité Monétaire Expérimentale » (UME).

À la fin de l'expérience, nous additionnerons les UME que vous avez gagnés à chacune des 6 rondes et nous convertirons le total en UME en dollars canadiens au taux de 55 UME pour 1\$ canadien. Ce montant vous sera remis en privé, en argent comptant, en plus des 10\$ pour être arrivé à l'heure prévue. Notez que nous ne tenons pas compte des UME obtenus dans la ronde de pratique. **En résumé, plus vous avez d'UME, plus vous recevez d'argent à la fin de la session.**

##### *Regroupement des joueurs*

On divisera au hasard les participants en deux catégories. Dans l'une des catégories, les joueurs seront arbitrairement dits « plus expérimentés » et dans l'autre « moins expérimentés ». Le premier écran vous indiquera de quelle catégorie vous faites partie. Veuillez noter que vous demeurez dans la même catégorie tout au long de l'expérience.

Chaque ronde, vous interagirez avec 5 autres joueurs. Plus précisément, nous formerons trois groupes de 6 personnes, soit 3 joueurs choisis au hasard dans la catégorie « plus expérimentés » et 3 choisis au hasard dans la catégorie « moins expérimentés ». Les groupes changent à la fin de chaque ronde.

#### Déroulement d'une ronde

- Au début de chacune des rondes, vous recevez initialement 200 UME .
- Au début de chaque période, on remet vos comptes de biens A et de biens B possédés à zéro. Puis, on vous donne 1 bien A.
- Vous pouvez ensuite vous procurer des biens A et des biens B.

### Achat de biens A

Vous participez à une vente aux enchères au cours de laquelle vous pouvez acheter et vendre des **biens A**. La vente aux enchères dure **2 minutes**.

- Pour **vendre** un bien A, inscrivez le nombre d'UME (le prix) pour lequel vous êtes prêt à vendre dans la colonne « offre de vente » et cliquez sur « offre de vente » au bas de l'écran. Ce montant s'inscrira sur l'écran des autres joueurs de votre cellule.
- Pour **acheter** un bien A, inscrivez le nombre d'UME (le prix) pour lequel vous êtes prêt à acheter dans la colonne « offre d'achat » et cliquez sur « offre d'achat » au bas de l'écran. Ce montant s'inscrira sur l'écran des autres joueurs de votre cellule.
- Pour **accepter** une offre d'achat (ou de vente) d'un autre joueur, sélectionner « vendre » (ou « acheter ») au bas de l'écran. Lorsqu'une offre d'achat ou de vente est acceptée, le bien A et les UME sont automatiquement transférés d'un joueur à l'autre.

Notez que :

- Pour vendre un bien A, vous devez le posséder au moment de la vente.
- On ne peut acheter ou vendre qu'un seul bien A à la fois.
- Tout bien A acheté lors de l'enchère peut être revendu au cours de la même enchère.
- Vous n'êtes pas obligé de participer à cette enchère si vous ne voulez posséder que le bien A qui vous est donné initialement.

### Achat de biens B

Après la vente aux enchères, vous pouvez acheter des biens B. Vous devez indiquer la quantité voulue dans la case qui apparaîtra à votre écran et cliquer sur continuer. Le prix d'achat du bien B est donné par un tableau sur votre feuille de jeu. Voici un exemple du tableau que vous aurez :

Tableau de prix du bien B

(Les valeurs du tableau sont les mêmes pour toutes les rondes.)

**Période 1 :** Prix du bien B = 20 UME

**Période 2 :**

Nb de biens B achetés <u>en période 1</u>	Prix d'un bien B (UME)
0	20
1	15
2	10
3	7,5
4	5
5	2,5
6	2

En suivant l'exemple du tableau ci-haut, vous devez payer 20 UME par bien B en période 1. Si vous choisissez d'acheter un bien B à la période 1, vous devrez payer 15 UME par bien B à la période 2, tandis que si vous achetez 3 biens B à la période 1, vous ne payez que 7,5 UME par bien B à la période 2.

Notez que :

- **Le prix d'achat du bien B est le même pour la période 1 de chaque ronde.** Ce prix est indiqué en haut du tableau.
- **Le prix en période 2 dépend de vos choix en période 1.** Plus vous achetez de biens B en période 1, moins le prix de B est élevé en période 2.
- L'achat de biens B en période 2 ne diminue pas le prix du bien B dans les rondes suivantes.
- Tous les joueurs « plus expérimentés » ont le même tableau, et tous les joueurs « moins expérimentés » ont le même tableau.
- Le prix des biens B est plus élevé pour les joueurs « moins expérimentés ».

**Comment calculer vos gains à la fin d'une période**

Après l'enchère de biens A et l'achat de biens B, vous obtenez un **revenu qui dépend de la somme de biens A et de biens B que vous possédez**. Ce revenu est déterminé par le tableau suivant :

Tableau des revenus

*(Les valeurs du tableau sont les mêmes pour tous les joueurs, pour toutes les rondes.)*

Biens A et B possédés	Revenu (UME)
0	0
1	100
2	160
3	180
4	160
5	100
6	0

Notez que :

- Votre revenu diminue lorsque vous possédez plus de **trois biens** au total.
- Les biens A et B sont des **substituts parfaits** : il n'y a pas de distinction dans le tableau des revenus selon que vous possédiez des biens A ou des biens B. Ils sont donc parfaitement interchangeables.

Le montant en UME que vous gagnez pour la période est nommé votre gain.

Voici comment le calculer :

$$\text{Gain} = \text{Revenu} + \text{UME gagnés de la vente de bien A} - \text{UME dépensés en achats (selon A+B) (lors de l'enchère) de biens A et de biens B}$$

Ci-dessous, vous trouverez le détail du calcul des gains pour l'exemple suivant. Soit, à la période 1, vous achetez 1 bien A à un prix de 15 UME et 1 bien B à un prix de 20 UME, pour un total de 3 biens incluant votre bien A initial. À la période 2, vous vendez votre bien A initial à un prix de 20 UME et vous achetez 2 biens B à un prix de

15 UME, pour un total de 2 biens. Vos gains sont de 145 UME à la période 1 et de 150 à la période 2.

Période	Revenu (selon A+B)	A		B		Gains
		UME dépensées – UME gagnées lors de l'enchère		Nb de B achetés	Prix d'achat d'un B	
1	180	- (15 – 0)	-	(1 x 20)		145
2	160	- (0 – 20)	-	(2 x 15)		150

Nous avons mis à votre disposition une calculatrice et une feuille de calcul afin que vous puissiez calculer et noter les gains résultant de différentes stratégies. Nous vous laisserons quelques minutes à cet effet avant le début de l'expérience.

#### *Fin de la période et de la ronde*

- À la fin de chaque période, un sommaire de vos décisions et de vos UME pour la période s'affiche à l'écran.
- Au début de la période 2, on remet vos comptes de biens A et de biens B à zéro et on vous donne un bien A. Vous devez à nouveau vous procurer des biens A et des biens B.
- Après 2 périodes, la ronde se termine. Un sommaire de la ronde s'affiche à l'écran.
- On remet votre compte d'UME au niveau initial et vos comptes de biens A et de biens B à zéro. On vous donne un bien A initial et une nouvelle ronde commence.
- L'expérience se termine après 6 rondes (plus la ronde de pratique).
- On vous rémunérera en additionnant vos gains pour chaque période de chaque ronde (sauf celle de pratique) et en les convertissant en dollars canadiens.

### Rappels

#### Distinction entre le bien A et le bien B

##### **Bien A**

- Chacun reçoit gratuitement un bien A au début de chaque période.
- Il y a une quantité fixée de bien A disponible sur le marché, soit les 6 biens A distribués à chaque période (un par joueur).
- Il y aura un marché où vous pouvez acheter et vendre des biens A aux autres joueurs à un prix variable, déterminé par une vente aux enchères.

##### **Bien B**

- Le bien B est disponible en quantité illimitée.
- Le prix du bien B est fixé d'avance par un tableau qui vous sera distribué.
- L'achat de biens B en période 1 diminue le prix d'achat des biens B en période 2.
- Le prix du bien B en période 1 est fixe pour toutes les rondes. Ainsi, l'achat de biens B en période 2 ne diminue pas le prix du bien B aux rondes suivantes.
- Les joueurs « plus expérimentés » peuvent se procurer le bien B à un prix initial inférieur par rapport aux joueurs « moins expérimentés ».

**Notez que les biens A et B sont des substituts parfaits : la possession de l'un ou de l'autre donne le même revenu.**



**À noter aussi :**

Le montant d'argent que vous recevrez dépend des décisions que vous prenez, c'est-à-dire des gains que vous accumulez au fil des périodes.

**Gain = Revenu + vente de biens A – dépense en achats de biens A et B**

où votre revenu dépend de la somme de biens A et de biens B que vous possédez.

**\*\*\*Aucune communication, verbale ou non verbale, ne sera tolérée durant l'expérience, sous peine d'expulsion sans aucune compensation monétaire. Si vous avez des questions au cours de l'expérience, veuillez lever votre main et un expérimentateur viendra vous voir. \*\*\***

**Exemple de feuille de jeu**

Prix du bien B:

**Période 1 :**

Prix du bien B = 5 UME

**Période 2 :**

Nb de biens B achetés <u>en période 1</u>	Prix d'un bien B (UME)
0	5
1	3,33
2	2,5
3	2
4	1,67
5	1,43
6	1,25

Tableau des revenus :

Biens A et B possédés	Revenu (UME)
0	0
1	100
2	160
3	180
4	160
5	100

UME initiaux :

100

Taux de conversion :

75 UME = 1\$

## Annexe II

Questionnaire + Solutionnaire

1. Répondez aux questions suivantes à l'aide du tableau de prix situé à la page 2 des instructions.
  - a) Supposons que vous achetiez deux biens B à la période 1, combien devrez-vous déboursier pour l'achat d'un bien B à la période 2? 10 UME
  - b) Supposons que vous payiez 20 UME pour un bien B à la période 2, combien de bien B avez-vous acheté à la période 1? 0 bien B
  
2. Répondez aux questions suivantes à l'aide du tableau de prix et du tableau de revenus respectivement situés aux pages 2 et 3 des instructions.
  - a) Quel sera votre gain pour la période 1 si vous vendez votre bien A à un prix de 17 UME lors de l'enchère et que vous achetez 3 biens B? Déterminez vos calculs (Indice, quel sera votre nombre total de bien? Le prix du bien B?)  
 $180 + 17 - 3 * 20 = 137 \text{ UME}$
  - b) Supposons que, par la suite, vous vendiez votre bien A à un prix de 10 UME en période 2 et que vous achetiez trois biens B. Quel sera votre gain pour la période 2? Déterminez vos calculs (Indice, quel sera votre nombre total de bien? Le prix du bien B?)  
 $180 + 10 - 3 * 7,5 = 167,5 \text{ UME}$
  
3. Répondez aux questions suivantes à l'aide du tableau de prix et du tableau de revenus respectivement situés aux pages 2 et 3 des instructions.
  - a) Quel sera votre gain pour la période 1 si vous achetez un bien A à un prix de 15 UME lors de l'enchère et que vous achetez 2 biens B ? Déterminez vos calculs (Indice, quel sera votre nombre total de bien? Le prix du bien B?)  
 $160 - 15 - 2 * 20 = 105 \text{ UME}$
  - b) Supposons que, par la suite, vous vendiez votre bien A à un prix de 12 UME en période 2 et que vous achetiez 4 biens B. Quel sera votre gain pour la période 2? Déterminez vos calculs (Indice, quel sera votre nombre total de bien? Le prix du bien B?)  
 $160 + 12 - 4 * 10 = 132 \text{ UME}$
  
4. Vrai ou Faux
  - a) Supposons que vous pouvez vous procurer le bien B à un coût de 20 UME et que vous voulez vendre votre bien A initial pour vous procurer un bien B. Sachant que vous êtes en **période 1**, vous pouvez maximiser vos gains pour la ronde en vendant votre bien A à un prix inférieur à 20 UME.

Vrai : En effet, en tenant compte de la réduction du prix de B à la période suivante si vous utilisez un bien B plutôt qu'un bien A, il peut être avantageux de vendre le bien A à un coût inférieur au bien B.

b) Supposons que vous pouvez vous procurer le bien B à un coût de 20 UME et que vous voulez vendre votre bien A initial pour vous procurer un bien B. Sachant que vous êtes en **période 2**, vous pouvez maximiser vos gains pour la ronde en vendant votre bien A à un prix inférieur à 20 UME.

Faux En effet, à la période 2, l'utilisation d'un bien B plutôt que d'un bien A n'entraîne pas de réduction future du prix du bien B. Ainsi, il n'est avantageux de vendre le bien A et de se procurer un bien B que si le prix du bien A est supérieur à celui du bien B.

5. a) Supposons que l'on veuille acheter un bien A ou B en **période 1**, qu'est-ce qui donne le plus grand gain pour la ronde si le prix de A est 15 UME et que le prix de B est 20 UME?

**iii) incertain**, car la diminution du prix de B en période 2 peut rendre avantageux l'achat de B, même si son prix est plus élevé que celui de A en période 1.

b) Supposons que l'on veuille acheter un bien A ou B en **période 2**, qu'est-ce qui donne le plus grand gain pour la ronde si le prix de A est 15 UME et que le prix de B est 20 UME?

**i) Acheter un bien A.** En effet, l'utilisation de B en période 2 ne diminue pas le prix futur de B. Ainsi, comme A et B sont des substituts parfaits, il est plus avantageux d'acheter celui que l'on peut se procurer au plus bas prix.

6. a) Supposons que l'on possède déjà deux biens A ou B en **période 1** et que le prix de A est 25 UME et celui de B est 25 UME. Qu'est-ce qui donne le plus grand gain pour la ronde?

**iv) incertain.** Si on achète le bien B, il faut tenir compte de la diminution du prix de B à la période 2. Ainsi, il peut être avantageux de se procurer un bien B au coût de 25 UME, même si les revenus supplémentaires apportés par ce bien ne sont que de 20 UME.

b) Supposons que l'on possède déjà deux biens A ou B en **période 2** et que le prix de A est 25 UME et celui de B est 25 UME. Qu'est-ce qui donne le plus grand gain pour la ronde?

**iii) Ne pas acheter de bien.** En effet, un bien supplémentaire procure 20 UME de revenu supplémentaire, mais coûte 25 UME. Ainsi, on a un gain inférieur si on achète un troisième bien.



