



HAL
open science

Les règles de fonctionnement du marché européen du carbone (2005-2007): le rôle du stockage et de l'emprunt de quotas, les fondamentaux du prix et les stratégies de gestion des risques

Julien Chevallier

► To cite this version:

Julien Chevallier. Les règles de fonctionnement du marché européen du carbone (2005-2007): le rôle du stockage et de l'emprunt de quotas, les fondamentaux du prix et les stratégies de gestion des risques. Economies et finances. Université de Nanterre - Paris X, 2008. Français. NNT : . tel-00344336

HAL Id: tel-00344336

<https://theses.hal.science/tel-00344336>

Submitted on 4 Dec 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'UNIVERSITE DE PARIS X NANTERRE n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses ; ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.

Résumé

Les règles de fonctionnement du marché européen du carbone (2005-2007) : le rôle du stockage et de l'emprunt de quotas, les fondamentaux du prix et les stratégies de gestion des risques

L'objet de cette thèse est l'analyse des règles de fonctionnement du marché européen du carbone (EU ETS) sur la période 2005-2007. Nous menons une analyse théorique et empirique sur le rôle du stockage et de l'emprunt de quotas, les fondamentaux du prix et les stratégies de gestion des risques, en lien avec l'introduction de quotas échangeables pour couvrir les émissions de CO_2 d'environ 10,600 installations en Europe.

Un premier Chapitre détaille les effets économiques et environnementaux attendus des mécanismes de stockage et d'emprunt de quotas sur un marché de permis d'émissions négociables. Plus spécifiquement, vis-à-vis des provisions adoptées dans l'EU ETS, nous étudions les effets de la restriction du transfert de quotas stockés ou empruntés entre les Phases I et II sur les changements de prix du CO_2 . Nous montrons statistiquement que les bas niveaux de prix du CO_2 enregistrés jusqu'à la fin de la Phase I sont expliqués par la restriction du transfert de quotas inter-périodes, au-delà des principales explications proposées par les observateurs de marché.

Un deuxième Chapitre développe une étude originale des fondamentaux du prix du carbone, introduit depuis le 1er Janvier 2005 en Europe. Nous soulignons le rôle central joué par l'évènement annuel de conformité 2005 imposé par la Commission Européenne, qui sert de révélateur des positions nettes courtes/longues des installations en quotas par rapport à leurs émissions vérifiées. Le résultat principal de cette étude met en évidence le fait que les fondamentaux du prix du CO_2 liés

aux marchés des énergies et aux évènements climatiques non-anticipés varient en fonction des évènements institutionnels. Par ailleurs, nous montrons l'influence de la variation de la production industrielle dans trois secteurs couverts par l'EU ETS sur les changements de prix du CO_2 en menant une analyse par décomposition, étendue par pays.

Un troisième Chapitre s'intéresse aux stratégies de gestion des risques liés à la détention de quotas de CO_2 . Nous proposons une méthode utilisée sur les marchés d'action pour recouvrer les changements dans l'aversion au risque moyenne des investisseurs. Cette étude indique que, sur la période considérée, l'aversion au risque est plus élevée sur le marché du carbone que sur les marchés d'action, et que le risque est lié à une structure de prix strictement croissants après l'évènement de conformité 2006. En lien avec le Chapitre 1, nous évaluons enfin comment le stockage de quotas peut être utilisé comme un outil de gestion des risques, pour faire face à l'incertitude politique sur un marché de quotas. Nous détaillons une règle optimale de partage des risques, et discutons du principe de mutualisation du risque lié à l'échange de quotas entre agents.

Nos travaux témoignent des difficultés rencontrées suite à la création du marché européen du carbone pour atteindre un signal prix cohérent avec des réductions d'émissions effectives par les industriels. Cependant, dans un contexte institutionnel mouvant, ces inefficiences ne semblent pas avoir été reportées vers la période 2008-2012.

Mots-clés : Marché de permis d'émissions négociables, EU ETS, Stockage et d'emprunt de quotas, Fondamentaux du prix du CO_2 , Aversion au Risque, Règle optimale de partage des risques.

Classification JEL : C14, D21, D80, G14, Q28, Q52, Q58.

Abstract

The European carbon market (2005-2007) : banking, pricing and risk hedging strategies

This thesis investigates the market rules of the European carbon market (EU ETS) during 2005-2007. We provide theoretical and empirical analyses of banking and borrowing provisions, price drivers and risk hedging strategies attached to tradable quotas, which were introduced to cover the CO_2 emissions of around 10,600 installations in Europe.

In Chapter 1, we outline the economic and environmental effects of banking and borrowing on tradable permits markets. More specifically, we examine the banking and borrowing provisions adopted in the EU ETS, and the effects of banning banking between Phases I and II on CO_2 price changes. We show statistically that the low levels of CO_2 prices recorded until the end of Phase I may be explained by the restriction on the inter-period transfer of allowances, besides the main explanations that were identified by market observers.

In Chapter 2, we identify the carbon price drivers since the launch of the EU ETS on January 1, 2005. We emphasize the central role played by the 2005 yearly compliance event imposed by the European Commission in revealing the net short/long position at the installation level in terms of allowances allocated with respect to verified emissions. The main result of this study features that price drivers of CO_2 allowances linked to energy market prices and unanticipated weather events vary around institutional events. Moreover, we show the influence of the variation of industrial production in three sectors covered by the EU ETS on CO_2 price changes by applying a disentangling analysis, that has also been extended at

the country-level.

In Chapter 3, we focus on the risk hedging strategies linked to holding CO_2 allowances. By using a methodology applied on stock markets, we recover the changes in investors' average risk aversion. This study shows that, during the time period considered, risk aversion has been higher on the carbon market than on the stock market, and that the risk is linked to an increasing price structure after the 2006 compliance event. With reference to Chapter 1, we finally evaluate how banking may be used as a risk management tool in order to cope with political uncertainty on a tradable permits market. We detail an optimal risk-sharing rule, and discuss the possibility of pooling the risk linked to allowance trading between agents.

Overall, this thesis highlights the inefficiencies following the creation of the European carbon market that prevented the emergence of a price signal leading to effective emissions reductions by industrials. However, in a changing institutional environment, these inefficiencies do not seem to have been transferred to the period 2008-2012.

Keywords : Tradable permit market, EU ETS, Banking and borrowing provisions, CO_2 Price Fundamentals, Risk Aversion, Optimal risk-sharing rule.

JEL Codes : C14, D21, D80, G14, Q28, Q52, Q58.

A ma famille

Table des matières

Table des matières	11
Table des figures	14
Liste des tableaux	19
Introduction générale	25
Présentation de la base de données commune aux Chapitres 1 et 2	47
1 Le rôle du stockage et de l'emprunt de quotas	57
1.1 Stockage et emprunt de quotas : une revue de littérature de la modélisation économique, des règles de fonctionnement actuelles et des perspectives de réforme	58
1.1.1 Les effets environnementaux et économiques du stockage et de l'emprunt de permis	60
1.1.2 Revue de littérature du stockage et de l'emprunt sur les marchés de permis en univers certain	63
1.2 Les effets de la restriction du stockage inter-périodes sur le prix européen du carbone : évidence empirique de la Phase I (2005-2007)	71
1.2.1 Les règles de fonctionnement du stockage et de l'emprunt de quotas adoptées dans l'EU ETS	74
1.2.2 Analyse	79
1.2.3 Base de données	85
1.2.4 Résultats d'estimation et discussion	89

Annexes relatives au Chapitre 1	101
2 Les fondamentaux du prix du CO₂	111
2.1 Fondamentaux et changements de structure du prix du CO ₂ liés aux décisions institutionnelles, aux prix des énergies et aux événements climatiques sur la période 2005-2007	112
2.1.1 Les principaux fondamentaux du prix du CO ₂	115
2.1.2 Base de données et spécification économétrique	118
2.1.3 Résultats et Interprétations	123
2.2 Fondamentaux du prix du CO ₂ liés aux effets de la variation de la production industrielle et aux positions de conformité	131
2.2.1 Les impacts potentiels de la production industrielle et des objectifs de conformité sur les changements de prix du CO ₂ .	134
2.2.2 Base de données et spécification économétrique	146
2.2.3 Résultats et discussion	152
2.3 Analyse par pays des effets de la variation de la production industrielle sur les changements de prix du CO ₂	159
2.3.1 Evolution de la production industrielle par pays en 2005-2006 dans les secteurs de la combustion et de la production de fer et d'acier	159
2.3.2 Plafond d'émissions et position de conformité par pays en 2005-2006 dans les secteurs de la combustion et de la production de fer et d'acier	161
2.3.3 Base de données et spécification économétrique	164
2.3.4 Résultats et discussion	165
Annexes relatives au Chapitre 2	171
3 Les stratégies de gestion des risques	193
3.1 L'aversion au risque et la diffusion d'informations institutionnelles sur le marché européen du carbone : une étude des résultats de la période de conformité 2006	194

3.1.1	Le comportement attendu des investisseurs vis-à-vis du risque sur le marché européen du carbone	197
3.1.2	Méthode d'estimation	200
3.1.3	Distribution de probabilité risque-neutre	202
3.1.4	Distribution de probabilité historique	206
3.1.5	Résultats d'estimation et discussion	211
3.2	Stockage de quotas en incertitude et règle optimale de partage des risques : théorie et évidence empirique	224
3.2.1	Comportement de la firme	227
3.2.2	Les stratégies de gestion des risques	233
3.2.3	Evidence empirique	239
3.2.4	Le comportement de mutualisation du risque lié à l'échange de quotas au niveau de la maison mère	242
	Annexes relatives au Chapitre 3	255
	Conclusion générale	281
	Bibliographie	287

Table des figures

1	PNAQs I dans l'EU ETS (2005-2007) d'après le CITL (2007) et la Caisse des Dépôts (2006)	37
2	PNAQs II dans l'EU ETS (2008-2012) d'après le CITL (2008) et la Caisse des Dépôts (2008)	38
3	Volumes échangés du prix spot 2005-2007 entre le 24 juin 2005 et le 25 avril 2008 en tonnes de CO ₂ d'après Bluenext	40
4	Evolution du prix du CO ₂ entre le 1er Juillet 2005 et le 30 Avril 2007 d'après Bluenext	48
5	Séries de prix d'échéance à un mois du Brent ICE, du gaz naturel Zeebrugge, du charbon CIF ARA entre le 1er Juillet 2005 et le 30 Avril 2007 d'après Reuters	49
6	Séries de prix de l'électricité d'échéance à un mois sur Bluenext, <i>clean spark spread</i> et <i>clean dark spread</i> entre le 1er Juillet 2005 et le 30 Avril 2007 d'après Bluenext, Tendances Carbone pour la Caisse des Dépôts	51
7	Séries de prix spot du CO ₂ et prix <i>switch</i> entre le 1er Juillet 2005 et le 30 Avril 2007 d'après Bluenext, Tendances Carbone pour la Caisse des Dépôts	52
8	Index européen de températures de Juillet 2005 à Avril 2007 d'après Bluenext et Tendances Carbone de la Caisse des Dépôts	55
1.1	Prix spot et futures du CO ₂ du 1er juillet 2005 au 17 décembre 2007 d'après BlueNext et ECX	78

1.2	Séries de prix du gaz naturel et du Brent transformées en erreurs de prévision du 1er juillet 2005 au 17 décembre 2007 d'après Zeebrugge Hub et ICE	86
1.3	Index européen de températures de juillet 2005 à décembre 2007 d'après Bluenext, et Tendances Carbone de la Caisse des Dépôts . .	86
1.4	Primes entre les prix spot du CO_2 et les futures de maturité décembre 2007-décembre 2008 transformées en erreurs de prévisions du 01/07/2005 au 17/12/2007 d'après BlueNext et ECX	87
1.5	Taux de rendement de l'Euribor à trois mois et de l'indice Dow Jones EURO STOXX 50 en points de pourcentage avec une fréquence quotidienne du 1er juillet 2005 au 17 décembre 2007 d'après la Banque de France et Euronext	88
2.1	Evolution du prix du CO_2 entre le 1er juillet 2005 et le 30 avril 2007 d'après Bluenext	116
2.2	Evolution de la production industrielle mensuelle dans les secteurs de la production de papier, de verre, de céramique, des raffineries et des fours à coke durant 2005-2006 basée sur la classification NACE Rev.1 C-F d'après Eurostat	137
2.3	Evolution de la production industrielle mensuelle dans les secteurs de la production de ciment, de fer, de métal, et de la combustion durant 2005-2006 basée sur la classification NACE Rev.1 C-F d'après Eurostat	137
2.4	Répartition de l'allocation par industrie en 2006 d'après le CITL, Trotignon <i>et al.</i> (2008)	140
2.5	Caractéristiques du secteur de la combustion dans l'EU ETS d'après le CITL, Trotignon <i>et al.</i> (2008)	140
2.6	Position de conformité des émissions par secteur de l'EU ETS sur la période 2005-2006 d'après Trotignon <i>et al.</i> (2008)	143
2.7	Position de conformité des émissions dans le secteur de la combustion sur la période 2005-2006 d'après Trotignon <i>et al.</i> (2008)	143

2.8	Position de conformité en terme d'émissions de CO ₂ et taux de croissance de la production dans les secteurs couverts par l'EU ETS en 2005 d'après Eurostat, le CITL et Trotignon <i>et al.</i> (2008)	145
2.9	Position de conformité en terme d'émissions de CO ₂ et taux de croissance de la production dans les secteurs couverts par l'EU ETS en 2006 d'après Eurostat, le CITL et Trotignon <i>et al.</i> (2008)	145
2.10	Evolution de la production industrielle dans le secteur de la combustion pour l'Allemagne, l'Espagne, la France, l'Italie, la Pologne et le Royaume-Uni en 2005 et 2006 basée sur la classification NACE Rev.1 C-F d'après Eurostat	160
2.11	Evolution de la production industrielle dans le secteur de la production de fer et d'acier pour l'Allemagne, l'Espagne, la France, l'Italie, la Pologne et le Royaume-Uni en 2005 et 2006 basée sur la classification NACE Rev.1 C-F d'après Eurostat	160
2.12	Allocation par pays dans le secteur de la combustion en 2005-2006 d'après le CITL, Trotignon <i>et al.</i> (2008)	162
2.13	Allocation par pays dans le secteur de la production de fer et d'acier en 2005-2006 d'après le CITL, Trotignon <i>et al.</i> (2008)	162
2.14	Positions de conformité par pays dans le secteur de la combustion en 2005-2006 d'après le CITL, Trotignon <i>et al.</i> (2008)	163
2.15	Positions de conformité par pays dans le secteur de la production de fer et d'acier en 2005-2006 d'après le CITL, Trotignon <i>et al.</i> (2008)	163
3.1	Prix spot du CO ₂ , futures de maturité décembre 2008 et décembre 2009 échangés du 24 juin 2005 au 23 novembre 2007 sur BlueNext et ECX	199
3.2	Erreurs de valorisation des prix d'option entre le marché du carbone et le prix de référence du modèle de Black-Scholes pour le contrat de maturité décembre 2008	205
3.3	Erreurs de valorisation des prix d'option entre le marché du carbone et le prix de référence du modèle de Black-Scholes pour le contrat de maturité décembre 2009	205

3.4	Ecart entre les contrats futures de maturité décembre 2008 et décembre 2009	208
3.5	Prix d'options disponibles par prix d'exercice sur ECX	212
3.6	Prix historique pour le contrat futures de maturité décembre 2008 d'après ECX	214
3.7	Prix historique pour le contrat futures de maturité décembre 2009 d'après ECX	214
3.8	Volatilité historique estimée avec le modèle GARCH(1,1) asymétrique pour le contrat de maturité décembre 2008	217
3.9	Volatilité historique estimée avec le modèle GARCH(1,1) asymétrique pour le contrat de maturité décembre 2009	217
3.10	Résultats d'estimation pour le contrat de maturité décembre 2008 avec $\tau = 1.3$. La courbe bleue dénote le sous-échantillon #1. La courbe rouge dénote le sous-échantillon #2.	220
3.11	Résultats d'estimation pour le contrat de maturité décembre 2009 avec $\tau = 1.3$. La courbe bleue dénote le sous-échantillon #1. La courbe rouge dénote le sous-échantillon #2.	221
3.12	Quotas distribués et émissions vérifiées pour ArcelorMittal en 2005 d'après Reuters Carbon Market Data	241
3.13	Quotas distribués et émissions vérifiées pour ArcelorMittal en 2006 d'après Reuters Carbon Market Data	241
3.14	Quotas distribués et émissions vérifiées pour ArcelorMittal en 2007 d'après Reuters Carbon Market Data	241
3.15	Quotas distribués et émissions vérifiées pour Dalkia en 2005 d'après Reuters Carbon Market Data	243
3.16	Quotas distribués et émissions vérifiées pour Dalkia en 2006 d'après Reuters Carbon Market Data	243
3.17	Quotas distribués et émissions vérifiées pour Dalkia en 2007 d'après Reuters Carbon Market Data	243
3.18	Quotas distribués et émissions vérifiées pour Eesti Energia en 2005 d'après Reuters Carbon Market Data	244

3.19	Quotas distribués et émissions vérifiées pour Eesti Energia en 2006 d'après Reuters Carbon Market Data	244
3.20	Quotas distribués et émissions vérifiées pour Eesti Energia en 2007 d'après Reuters Carbon Market Data	244
3.21	Quotas distribués et émissions vérifiées pour Enel en 2005 d'après Reuters Carbon Market Data	246
3.22	Quotas distribués et émissions vérifiées pour Enel en 2006 d'après Reuters Carbon Market Data	246
3.23	Quotas distribués et émissions vérifiées pour Enel en 2007 d'après Reuters Carbon Market Data	246
3.24	Quotas distribués et émissions vérifiées pour Eon en 2005 d'après Reuters Carbon Market Data	247
3.25	Quotas distribués et émissions vérifiées pour Eon en 2006 d'après Reuters Carbon Market Data	247
3.26	Quotas distribués et émissions vérifiées pour Eon en 2007 d'après Reuters Carbon Market Data	247
3.27	Quotas distribués et émissions vérifiées pour RWE en 2005 d'après Reuters Carbon Market Data	249
3.28	Quotas distribués et émissions vérifiées pour RWE en 2006 d'après Reuters Carbon Market Data	249
3.29	Quotas distribués et émissions vérifiées pour RWE en 2007 d'après Reuters Carbon Market Data	249
3.30	Quotas distribués et émissions vérifiées pour Union Fenosa en 2005 d'après Reuters Carbon Market Data	251
3.31	Quotas distribués et émissions vérifiées pour Union Fenosa en 2006 d'après Reuters Carbon Market Data	251
3.32	Quotas distribués et émissions vérifiées pour Union Fenosa en 2007 d'après Reuters Carbon Market Data	251
3.33	Le noyau de prix dans une économie à la Black Scholes	261

Liste des tableaux

1	Accords différenciés de réduction des émissions de CO ₂ dans l'UE d'après Marklunda et Samakovlis (2007)	26
2	Statut du Protocole de Kyoto d'après Barrett (1998)	28
1.1	Glossaire des unités utilisées dans le Protocole de Kyoto	102
1.2	Résumé des mécanismes de stockage et d'emprunt de quotas et liquidité sur plusieurs marchés de permis d'émissions négociables d'après Haites (2006)	103
1.3	Dates de communications officielles entre la France, la Pologne et la Commission Européenne concernant les PNAQs II d'après la DG Environnement	105
1.4	Résultats de l'échantillon complet	106
1.5	Résultats de l'échantillon " Avant l'évènement de conformité"	107
1.6	Résultats de l'échantillon " Après l'évènement de conformité"	108
1.7	Intervalles de confiance pour le test de la règle de Hotelling*	109
1.8	Statistiques descriptives	110
2.1	Statistiques Descriptives	172
2.2	Statistiques du test de Chow	172
2.3	Résultats d'estimation obtenus pour l'échantillon complet	173
2.4	Résultats d'estimation obtenus pour le sous-échantillon " avant l'évènement de conformité"	174
2.5	Résultats d'estimation obtenus pour le sous-échantillon " après l'évènement de conformité"	175

2.6	Résultats d'estimation obtenus pour les sous-périodes " Juin 2006 - Octobre 2006" et " Octobre 2006 - Avril 2007"	176
2.7	Tests de robustesse des résultats par l'estimation d'un modèle GARCH(1,1) 177	
2.8	Décomposition des secteurs industriels couverts par l'EU ETS d'après la Directive 2003/87/CE, Annexe I	179
2.9	Croissance de la production industrielle dans les secteurs couverts par l'EU ETS durant 2005-2006 d'après Eurostat	180
2.10	Allocation de quotas (MtCO ₂), niveau d'émissions (MtCO ₂) et position de conformité (en %) dans l'EU ETS durant 2005-2006 d'après le CITL, les registres nationaux, les PNAQs, Trotignon et al. (2008)	181
2.11	Décomposition des secteurs de l'EU ETS et classification NACE Rev.1 C-F d'après Eurostat	182
2.12	Statistiques Descriptives	183
2.13	Matrice de corrélations croisées entre les variables sectorielles de production industrielle	184
2.14	Résultats de l'estimation des eq.(2.3),(2.4) avec le modèle TGARCH(1,1)	185
2.15	Croissance de la production industrielle dans les secteurs de la combustion et de la production de fer et d'acier en 2005-2006	187
2.16	Statistiques Descriptives	188
2.17	Matrice de corrélations croisées entre variables sectorielles de production industrielle transformées en erreur de prévision pour les secteurs de la combustion et de la production de fer et de papier en Allemagne, Espagne, France, Italie, Pologne et Royaume-Uni	189
2.18	Résultats d'estimation des eq.(2.3),(2.4),(2.5) pour le secteur de la combustion au niveau EU 25 / par pays	190
2.19	Résultats d'estimation des eq.(2.3),(2.4),(2.5) pour le secteur de production de fer et d'acier au niveau EU 25 / par pays	191
3.1	Statistiques du test de l'écart entre les séries de prix futures de maturité Décembre 2008 et Décembre 2009	263
3.2	Nombre de prix d'options disponibles sur ECX	264

3.3	Volume moyen par contrat pour chaque prix d'exercice sur ECX . . .	265
3.4	Statistiques descriptives pour les contrats de maturité Décembre 2008 et Décembre 2009	266
3.5	Résultats d'estimation pour les contrats de maturité Décembre 2008 et Décembre 2009	267
3.6	Quotas distribués, émissions vérifiées et position nette courte/longue pour ArcelorMittal (2005-2007) d'après Reuters Carbon Market Data	270
3.7	Quotas distribués, émissions vérifiées et position nette courte/longue pour Dalkia, Installations #1-42 (2005-2007) d'après Reuters Carbon Market Data	271
3.8	Quotas distribués, émissions vérifiées et position nette courte/longue pour Dalkia, Installations #43-84 (2005-2007) d'après Reuters Carbon Market Data	272
3.9	Quotas distribués, émissions vérifiées et position nette courte/longue pour Dalkia, Installations #85-125 (2005-2007) d'après Reuters Carbon Market Data	273
3.10	Quotas distribués, émissions vérifiées et position nette courte/longue pour Eesti Energia et Enel (2005-2007) d'après Reuters Carbon Market Data	274
3.11	Quotas distribués, émissions vérifiées et position nette courte/longue pour E.ON, Installations #1-45 (2005-2007) d'après Reuters Carbon Market Data	275
3.12	Quotas distribués, émissions vérifiées et position nette courte/longue pour E.ON, Installations #46-89 (2005-2007) d'après Reuters Carbon Market Data	276
3.13	Quotas distribués, émissions vérifiées et position nette courte/longue pour RWE, Installations #1-37 (2005-2007) d'après Reuters Carbon Market Data	277
3.14	Quotas distribués, émissions vérifiées et position nette courte/longue pour RWE, Installations #38-73 (2005-2007) d'après Reuters Carbon Market Data	278

- 3.15 Quotas distribués, émissions vérifiées et position nette courte/longue
pour Union Fenosa (2005-2007) d'après Reuters Carbon Market Data 279

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Gilles Rotillon, qui a accepté d'encadrer cette thèse, et Pierre-André Jovet, qui m'a aiguillé sur bien des aspects aboutissant au présent travail de recherche. En me faisant partager leur expérience, tous deux m'ont également montré combien la recherche peut être passionnante, quand elle est lancée sur des pistes originales. A ce titre, je souhaite remercier Denny Ellerman, Olivier Godard et Katheline Schubert pour avoir organisé en 2005 un séminaire de recherche sur les marchés de permis d'émissions négociables, dont les enseignements se sont révélés très utiles au cours de cette thèse.

L'étude sur les fondamentaux du prix du carbone dans le Chapitre 2 a été rendue possible grâce à une collaboration fertile avec Emilie Alberola et Benoît Chèze. Notre travail a été facilité par l'utilisation de la base de données Tendances Carbone de la Caisse des Dépôts. Je remercie chaleureusement Christian de Perthuis pour nous avoir permis d'accéder à ces données, ainsi qu'à la cellule d'expertise sur le marché du carbone que constitue d'ores et déjà la Mission Climat. Emmanuelle Taugourdeau et Gunther Capelle-Blancard nous ont également apporté d'utiles commentaires au cours de l'élaboration de ce travail.

Les travaux sur l'aversion au risque sur le marché européen du carbone sont issus d'une collaboration, très riche en enseignements, avec Florian Ielpo et Ludovic Mercier. Nous remercions Dexia pour nous avoir gracieusement autorisé l'accès à la base de données sur les produits dérivés. Les travaux développés dans la suite du Chapitre 3 sont issus de recherches antérieures de Johanna Etner et Pierre-André Jovet sur le thème de la gestion des risques et de la pratique du stockage sur les marchés de permis. Je leur suis donc très reconnaissant de m'avoir permis de participer à ce projet de recherche.

Je remercie Olivier Beaumais et Derek Bunn pour avoir accepté la charge de rapporteur, ainsi que Thierry Bréchet et Denny Ellerman pour avoir accepté de faire partie du jury. Mes derniers remerciements, et non les moindres, vont à

Valérie Mignon pour sa disponibilité concernant des questions économétriques, sa générosité et sa précieuse relecture lors des différentes versions de ce travail.

Enfin, je remercie Slim, Pascal, Vincent, tout le cop des doctorants du bâtiment G à Nanterre, et le personnel administratif d'EconomiX, qui maintiennent une ambiance conviviale de travail, ainsi qu'à Leslie pour son soutien indéfectible lors de ces bûcheuses années de thèse.

Introduction générale

Le Système d'Echange des Quotas Européens (SEQE), ou *European Union Emissions Trading Scheme* (EU ETS) en anglais, a été créé le 1er janvier 2005 dans le but de réduire de 8% les émissions de CO₂ dans l'Union Européenne (UE) d'ici 2012, par rapport à leur niveau de 1990. Cet objectif agrégé de réduction d'émissions dans l'UE a fait l'objet d'Accords Différenciés, répartissant les efforts devant être effectués par chaque Etat-Membre en fonction de leur potentiel de "décarbonisation" de leur économie (voir le Tableau 1). L'introduction d'un marché de quotas a été décidée en prévision des engagements pris par les Etats-Membres dans le cadre du Protocole de Kyoto, entré en vigueur en février 2005 suite à la ratification de l'Islande, et qui vise à diminuer les émissions de six gaz à effet de serre (GES) qui sont considérés comme la cause principale du réchauffement climatique. Parmi les Etats-Membres de l'Annexe B, ces engagements comportent des réductions d'émissions de CO₂ pour 38 pays industrialisés, avec une réduction globale de 5,2% des émissions de CO₂ (voir le Tableau 2). Ces accords découlent de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC, ou UNFCCC en anglais) qui reconnaît trois principes : le principe de précaution¹, le principe de responsabilité commune mais différenciée², et le principe du droit

¹L'incertitude scientifique quant à l'impact exact du changement climatique ne justifie pas de différer les mesures à prendre.

²Chaque pays signataire reconnaît l'impact des ses émissions de GES sur le réchauffement climatique. Les pays les plus industrialisés portent une responsabilité historique accrue, du fait de leur développement antérieur fortement intensif en émissions de GES, qui se traduit par une cible de réduction plus contraignante.

Pays	Part des émissions de l'UE en 1990	Accords différenciés
Autriche	1.7	-13.0
Belgique	3.2	-7.5
Danemark	1.7	-21.0
Finlande	1.7	0.0
France	14.7	0.0
Allemagne	27.7	-21.0
Grèce	2.4	25.0
Irlande	1.3	13.0
Italie	12.5	-6.5
Luxembourg	0.3	-28.0
Pays-Bas	4.8	-6.0
Portugal	1.6	27.0
Espagne	7.0	15.0
Suède	1.6	4.0
Royaume Uni	17.9	-12.5
Total EU	100.0	8.0

TAB. 1 – Accords différenciés de réduction des émissions de CO₂ dans l'UE d'après Marklunda et Samakovlis (2007)

au développement³. 174 pays, dont le dernier en date est l'Australie le 3 Décembre 2007, ont ratifié le Protocole, à l'exception notable des Etats-Unis⁴. La première période d'engagement du Protocole de Kyoto couvre la période allant du 1er janvier 2008 au 31 décembre 2012.

Cette volonté politique a été ré-affirmée au niveau international lors de la Conférence de l'Organisation des Nations Unies (ONU) à Bali au mois de Décembre 2007, où a été adoptée une feuille de route des négociations devant aboutir à un accord post-Kyoto, et dont les Etats-Unis seraient partie prenante, à l'image des initiatives de plafonnement des émissions mises en place au niveau régional⁵. Le

³Les actions à prendre se feront dans le respect du développement économique de chaque pays.

⁴Les Etats-Unis ont en effet signé le Protocole le 12 novembre 1998, mais refusent de le ratifier.

⁵Nous pouvons citer principalement la *Regional Greenhouse Gas Initiative* (RGGI) comprenant divers objectifs de réductions d'émissions de GES dans 9 Etats du nord-est des Etats-Unis, et l'*Assembly Bill 32* en Californie qui vise à réduire les émissions de CO₂ de 25% d'ici 2020 par rapport au niveau de 1990, et de 80% d'ici 2050. Au niveau fédéral, l'initiative législative des Sénateurs Lieberman-McCain, le *Climate Stewardship Act*, n'a pas trouvé de soutien politique

prochain round de négociations aura lieu à Copenhague au mois de Décembre 2009. Le Mécanisme de Développement Propre (MDP)⁶ ayant révélé le fort potentiel d'abattement d'émissions de CO₂ dans des pays tels que le Brésil, la Chine ou l'Inde, l'enjeu de ces négociations porte sur un degré de coopération le plus large possible, écartant les comportements classiques de passager clandestin dans la préservation du bien public global que constitue le climat. L'Union Européenne a dans cette perspective clairement adopté une position de leader, tranchant avec les réticences émises lors des premières étapes de la négociation du Protocole de Kyoto.

En janvier 2008, la Commission Européenne a étendu son champ d'action contre le réchauffement climatique à l'horizon 2020 par l'intermédiaire du paquet énergie-climat. Ce dernier vise à réduire les émissions de GES de 20%, à porter la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique à 20%, et à économiser 20% d'énergie en augmentant l'efficacité énergétique. Le marché européen du carbone, actuellement dans Phase II (2008-2012), a été confirmé jusqu'en 2020 également. Son champ d'application s'étendra à des secteurs majeurs en terme de croissance des émissions de CO₂, telles que l'aviation et les industries pétro-chimiques sur la période 2013-2020. Ces engagements répétés des pouvoirs publics en matière de préservation du climat visent à corriger l'externalité négative liée aux émissions non contrôlées de GES dans l'atmosphère et de ce fait, selon le principe bien connu des économistes, à internaliser le coût social du carbone. En même temps, ces initiatives indiquent toute la difficulté à créer une rareté sur les émissions de CO₂. En effet, celles-ci ne faisaient pas l'objet de limitations dans l'environnement institutionnel pré-existant, et ne pouvaient donc pas être considérées comme une ressource rare. En France, un rapport d'étude du Centre d'analyse stratégique sur la valeur tutélaire du carbone a récemment cherché à caractériser le profil temporel du prix du carbone. Une des conclusions principales

suffisant pour être adoptée de façon contraignante.

⁶D'après l'article 12 du Protocole de Kyoto, les MDP sont des projets donnant lieu à des réductions d'émissions de GES dans les pays non-Membres de l'Annexe B, et dont la validation par la CCNUCC donne lieu à la délivrance de crédits pouvant être utilisés par les pays signataires pour assurer leur position de conformité.

Membres de l'Annexe I	Emissions de CO_2 en 1990 (gigagrammes)	Part en % des émissions en 1990 parmi les Membres de l'Annexe I	Cible Kyoto (2008-12) (% relativement aux émissions 1990)
Etats-Unis	4,957,022	36.00	93
Union Européenne	3,288,667	24.05	92
Autriche	59,200	0.43	92
Belgique	114,410	0.84	92
Danemark	52,025	0.38	92
Finlande	53,900	0.39	92
France	366,536	2.68	92
Allemagne	1,014,155	7.42	92
Grèce	82,100	0.60	92
Irlande	30,719	0.22	92
Italie	428,941	3.14	92
Luxembourg	11,343	0.08	92
Pays-Bas	167,600	1.23	92
Portugal	42,148	0.31	92
Espagne	227,322	1.66	92
Suède	61,256	0.45	92
Royaume Uni	577,012	4.22	92
Australie	288,965	2.11	108
Canada	462,643	3.38	94
Islande	2,172	0.02	110
Japon	1,155,000	8.45	94
Nouvelle Zélande	25,476	0.19	100
Norvège	35,514	0.26	101
Suisse	45,070	0.33	92
Liechtenstein	208	n.a.	92
Monaco	n.a.	n.a.	92
Economies en Transition	3,364,259	24.60	103
Bulgarie	82,990	0.61	107
République Tchèque	165,792	1.21	92
Estonie	37,797	0.28	92
Hongrie	71,673	0.52	110
Lettonie	22,976	0.17	92
Lituanie	n.a.	n.a.	92
Pologne	414,930	3.03	108
Roumanie	171,103	1.25	107
Fédération Russe	2,388,720	17.47	100
Ukraine	n.a.	n.a.	100
Slovaquie	58,278	0.43	92
Croatie	n.a.	n.a.	95
Slovénie	n.a.	n.a.	92
Total 1990	13,675,067	100	95

TAB. 2 – Statut du Protocole de Kyoto d'après Barrett (1998)

de ce rapport révèle une trajectoire de prix strictement croissante, atteignant une valeur sensiblement plus élevée qu'actuellement aux alentours de 100 €/tonne à l'horizon 2050. Ces projections signalent aux industriels la nécessité de prendre en compte les coûts liés aux réductions d'émissions de CO₂ dans leurs plans d'investissement sur le moyen terme.

Suite à ce bref tour d'horizon des politiques climatiques en vigueur, et des négociations en cours sur le plan international, nous précisons dans ce qui suit l'intérêt de la régulation environnementale par les marchés de permis.

En quoi les marchés de permis d'émissions négociables sont-ils différents ?

Pour répondre à cette question, il apparaît utile de discuter dans un premier temps des notions de "droit à polluer" et de "marchandisation de l'environnement". Nous nous basons sur la controverse soulevée par l'introduction de marchés de permis aux Etats-Unis, et résumée par Sandel (1997).

Etant donné que l'objectif du Protocole de Kyoto consiste à limiter le niveau global d'émissions de GES, quelle différence y a-t-il entre les endroits sur la planète qui émettent moins de carbone ? Ce qui a priori ne fait aucune différence du point de vue de l'atmosphère peut néanmoins s'avérer problématique du point de vue politique. En effet, le fait de rendre la pollution similaire à une matière première, pouvant être achetée ou vendue, enlève le stigma moral qui lui est justement associé. Si une firme ou un pays reçoit une pénalité pour avoir émis une quantité excessive de polluants dans l'atmosphère, la société porte un jugement négatif sur le comportement du pollueur. Au contraire, un "droit à polluer" transforme la pollution en un coût associé à l'activité de la firme, tout comme le fait de verser des salaires, de toucher des bénéfices ou des rentes.

Nous pouvons opposer à ces arguments qu'il n'y a rien eu d'immoral à réduire les émissions de SO₂ des compagnies électriques aux Etats-Unis, à une vitesse supérieure aux projections, et en économisant ainsi un milliard \$/an sur la facture d'électricité des consommateurs. De plus, toute activité industrielle suppose la création d'une quelconque forme de pollution. La question n'est pas alors de

savoir si les firmes doivent polluer, mais quelle est la quantité totale de pollution souhaitable. Et, si la pollution est inévitable, le rôle du régulateur ne consiste-t-il pas à mettre en place des dispositifs d'incitation économiques de façon à lutter contre les conséquences néfastes sur l'environnement ? Les marchés de permis ne facilitent-ils pas la révélation de ces trade-offs ?

Nous pouvons donc conclure que le maintien d'un stigma moral apparaît justifié dans le cas de déversement de polluants dangereux, où les pollueurs ont le choix de réduire cette pollution. Cet argument ne semble pas cependant pas s'appliquer au cas du changement climatique. En effet, le consommateur lambda doit-il se sentir honteux à l'idée d'allumer la lumière, de faire la cuisine ou d'allumer son ordinateur pour écrire un article ? Ces simples actions quotidiennes ne peuvent pas être légitimement associées à des comportements immoraux. C'est plutôt le niveau actuel de consommation par tête, en différents lieux de la planète, qui n'apparaît pas compatible avec le changement climatique observé. Le débat sur l'introduction de marchés de permis devrait donc plutôt porter sur l'acceptation que l'état de la planète n'est plus compatible avec mode de consommation où les prix des énergies sont peu onéreux.

Discutons à présent de l'influence grandissante du marché en tant qu'outil de régulation des externalités environnementales. Avec l'extension progressive de l'échelle des activités humaines, nous pouvons noter une demande croissante de biens environnementaux. Des sociétés ayant des niveaux de revenus élevés ont ainsi tendance à donner plus de valeur aux biens environnementaux, selon la relation de la courbe de Kuznets environnementale⁷. Comment, dans ce contexte, gérer la rareté des biens environnementaux ? Simultanément, nous soulignons une tendance croissante à recourir au marché, comme les récentes expériences de dérégulation des marchés de l'électricité et des télécommunications l'ont montré en Europe lors des dernières décennies. A cet effet, nous distinguons les marchés *organisés*, où le gouvernement intervient principalement pour assurer la conformité aux mécanismes de régulation⁸, et les marchés *construits* qui apparaissent dans le champ de la

⁷Notons que la vérification empirique de cette relation fait l'objet de nombreuses discussions, qu'il ne nous appartient pas de développer ici.

⁸Telles que les activités anti-trust par exemple.

régulation environnementale avec le besoin de créer une institution⁹. Ce dernier cas implique une redéfinition du rôle du gouvernement, qui consiste à créer un marché pour des besoins individuels, et ensuite à ne plus intervenir pour réguler.

Les circonstances favorables à l'adoption de marchés de permis incluent l'existence d'un grand nombre d'agents, une structure d'information asymétrique et stratégique, un fort degré d'hétérogénéité de coûts et de potentiel d'abattement entre des agents décentralisés, et une incertitude portant sur la forme des courbes de coût et de dommages¹⁰. La principale caractéristique d'un tel système de plafonnement des émissions consiste à autoriser les agents à échanger des permis avec une limite en quantité, sans approbation du régulateur. Pour les firmes, la seule obligation vis-à-vis du régulateur consiste à contrôler leurs émissions et restituer des permis. Les "droits d'émissions" sont rendus explicites par la distribution de permis aux installations. Les firmes sont alors liées par les termes d'un contrat implicite, où les permis deviennent des inputs à la production, et sont échangés en tant que tel. La décision d'abattement est déplacée au niveau de la firme, qui détient plus d'informations concernant son potentiel de réduction des émissions que le régulateur. La tâche du régulateur consiste alors essentiellement à contrôler le respect du plafond d'émissions.

Peut-on avancer des arguments venant tempérer l'enthousiasme en faveur de l'adoption de marché de permis? D'après Ellerman et al. (2000), le Programme de Lutte contre les Pluies Acides aux Etats-Unis fournit une solide expérience empirique appuyant l'idée selon laquelle les instruments de marché peuvent être plus efficaces sur le plan environnemental que les mécanismes de régulation traditionnels par des standards ou des règles. Les émissions de SO₂ ont chuté, et le programme a été caractérisé par une mise en place rapide, un rôle positif du stockage de permis (le double du montant anticipé), une conformité satisfaisante, et pas de concentration des émissions sur des lieux géographiques spécifiques. Ces résultats optimistes s'appliquent à des polluants de *flux*, dont les répercussions sur l'environnement sont immédiates. Ils peuvent être limités dans le cadre du

⁹Dans le but de fournir une meilleure qualité de l'air ou de l'eau par exemple.

¹⁰Sur ce dernier point, se référer à l'article fondateur de Weitzman (1974).

changement climatique par le fait que le CO₂ est un polluant de *stock* s'agrégant progressivement dans l'atmosphère, et pour lequel les incitations d'abattement sont temporellement et spatialement moins contraignantes. Enfin, Babiker et al. (2004) précisent que tous les pays ne bénéficient pas de la même façon de l'introduction d'un système international d'échange de permis, étant donné l'environnement institutionnel pré-existant et les changements associés aux termes de l'échange.

Après avoir discuté des principales différences des marchés de permis vis-à-vis des autres modes de régulation environnementale, nous détaillons quelques choix à faire par le régulateur lors de la création d'un marché de permis, concernant notamment les limites spatiales et temporelles, l'allocation initiale, ainsi que l'introduction d'une valve de sécurité.

Choix lors de la création d'un marché de permis

Limites spatiales et temporelles

Concernant les limites spatiales, il convient de souligner des effets d'échelle. A une échelle plus importante, l'efficacité économique a tendance à augmenter sur un marché de permis, mais cela réduit dans le même temps la sécurité liée aux échanges. Le régulateur doit aussi prendre en compte des contraintes de déposition, en évitant la concentration de polluants au-delà de seuils critiques sur des zones géographiques spécifiques¹¹. Enfin, des contraintes supplémentaires s'imposent au régulateur dans un cadre international, avec la définition de cibles d'émissions nationales.

Concernant les limites temporelles, le stockage et l'emprunt de permis peuvent être utilisés pour égaliser les coûts marginaux d'abattement en valeur présente. Ces mécanismes constituent une autre dimension de l'efficacité, en ajoutant la notion temporelle aux économies de coûts pouvant être réalisées. Les incitations au stockage de permis proviennent d'un durcissement de la contrainte environnementale. Cependant, dans un contexte où les plafonds d'émissions sont fixés à un niveau sous-optimal dû à la négociation politique, il peut être intéressant d'autoriser

¹¹Ce commentaire dépend naturellement de la nature du polluant.

l'emprunt de permis de façon à faciliter l'ajustement à la cible d'émissions.

Allocation initiale

D'après Raymond (1996), l'allocation initiale révèle des normes sociales, et ce que la société considère comme acceptable concernant la répartition de permis nouvellement créés. Parmi les principales méthodes d'allocation, nous pouvons citer la méthode suivant les "droits du grand père" (distribution gratuite en proportion des émissions récentes ou d'un benchmark, ou *grandfathering* en anglais), les enchères, les méthodes basées sur un seuil de départ des émissions, les méthodes basées sur le niveau de production, ou encore la méthode d'allocation par tête (en proportion de la population). Il n'est pas évident de donner un avis tranché sur la façon dont les permis doivent être distribués. Si, en théorie, les enchères apparaissent comme la meilleure méthode d'allocation (Ekins et Barker (2001), JMR (2005a, 2005b)), cela peut entraîner des objections en terme d'équité. La définition d'une méthode d'allocation "juste" s'avère problématique, et des "compromis"¹² doivent être trouvés entre les intérêts locaux et globaux des parties prenantes, ce qui nous ramène à la définition de ce qui apparaît "acceptable", à l'image des négociations liées aux politiques climatiques au niveau international.

Newell et al. (2005) précisent que les marchés de permis créent des rentes, et critiquent l'allocation suivant les "droits du grand père", car celle-ci distribue les rentes aux firmes existantes, en même temps qu'elle introduit des barrières à l'entrée. Pour contre-balancer ces effets négatifs, notons que l'allocation directe de permis selon les "droits du grand père" facilite l'adhésion au mode de régulation par un marché de permis. Une fois que le marché est en place, le régulateur peut rechercher à durcir la contrainte environnementale.

Enfin, notons que le régulateur peut choisir des cibles d'émissions en valeur absolue (un montant fixe de permis connu à l'avance) ou en valeur relative (par rapport à la production ou à un standard technologique par exemple) (Ellerman et SueWing (2003)).

Il apparaît utile de distinguer l'*efficacité* du marché de permis à réduire les

¹²D'après la notion définie par Boltanski et Thévenot (1991).

émissions, de sa *performance économique*, c'est à dire quels effets peut-on attendre des règles d'allocation. Le principal intérêt d'une mise aux enchères des permis consiste dans la redistribution du produit des enchères, sous la forme d'une subvention ou d'une réduction de taxe, venant réduire des distortions pré-existantes. Cet effet de recyclage du revenu de la rente, également appelé *double dividende*, doit être évalué en fonction de la structure de taxation. Si les réductions de taxes bénéficient davantage aux quintiles ayant un revenu élevé, cette méthodologie peut aussi poser des difficultés du point de vue de l'efficacité et de l'équité (Dinan et Rogers (2002)).

Valve de sécurité

Une valve de sécurité est un instrument hybride limitant le coût du plafonnement des émissions à une cible donnée, où le régulateur offre de vendre des permis en quantité illimitée selon un prix pré-déterminé. Si les prix sont supérieurs aux anticipations, les coûts marginaux d'abattement sont limités par le prix de la valve de sécurité. Cela limite donc les pertes de bien-être liées à l'échange de permis basées sur les anticipations des coûts et bénéfices marginaux. Un autre avantage consiste à conserver l'attractivité d'une cible en quantité, et l'utilisation d'un mécanisme de prix pour réguler les émissions de polluants. La principale critique de l'introduction d'une valve de sécurité consiste dans la détermination du "juste" prix par le régulateur : si le prix est trop élevé, cette mesure n'aura aucun effet. Inversement, si le prix est trop bas, la quantité de réduction d'émissions n'apparaît pas contraignante et peut être assimilée à une taxe permanente. De plus, il existe un danger potentiel pour l'intégrité environnementale du marché de permis, si la valve de sécurité consiste à relaxer les cibles de réduction, au lieu d'inciter les firmes à adopter des comportements de réduction efficaces. Le régulateur doit donc s'efforcer d'éviter des violations excessives par rapport à l'objectif de réduction initial. Au total, il convient de s'interroger sur l'utilité de diluer la contrainte en terme de quantité de réductions d'émissions.

Le programme RECLAIM en Californie régulant les émissions de SO_2 et de NO_x de plusieurs sources constitue un bon exemple d'un marché de permis qui

aurait eu besoin d'une valve de sécurité. En présence d'une flexibilité temporelle et d'une échelle géographique limitées, des conditions climatiques exceptionnelles et le manque de capacité de production ont placé une demande trop forte sur les installations existantes, entraînant une augmentation subite du prix du permis, de 5 000\$ à 90 000\$ la tonne. Cette déconnexion entre le marché de la production d'électricité et le marché de permis, ainsi que d'autres erreurs dans la création du programme¹³, ont conduit à l'intervention de l'Etat fédéral pour réguler l'offre d'électricité adéquate (Harrison (2003)).

Jacoby et Ellerman (2004) rappellent que les discussions sur l'adoption d'une valve de sécurité ont émergé lors des négociations du Protocole de Kyoto, de façon à accroître la probabilité d'un accord, et à limiter les critiques liées aux coûts trop élevés des objectifs de Kyoto. Il n'apparaît cependant pas toujours souhaitable de limiter les variations de prix sur les marchés. Les quotas étant distribués gratuitement, ils forment des actifs compensant le coût de la contrainte des émissions de CO₂, et rendent la position nette des firmes plus ou moins constante. Par ailleurs, des outils financiers comme les marchés à terme peuvent protéger les firmes contre des instabilités temporaires. Pour obtenir des prix stables et prévisibles, les Etats pourraient simplement imposer une taxe. Or, cette dernière solution entraîne des résistances trop importantes au niveau international.

A l'aune de ces choix à effectuer par le régulateur lors de la création du marché, l'EU ETS a été lancé dans un but d'apprentissage aux mécanismes d'échanges de permis, dont il convient d'explicitier ci-dessous les principales caractéristiques.

Organisation et évolution du marché européen du carbone

Couverture

L'EU ETS est régie par la Directive 2003/87/CE. Ce dispositif concerne environ 10 600 installations en Europe, principalement dans les secteurs de la production d'électricité, de fer et d'acier, de raffineries, de pulpe et de papier, du ciment et

¹³Tels que le manque de pénalité civiles et criminelles, ou des caractéristiques concernant le risque de fermeture de certaines installations.

d'autres matériaux de construction. Les installations dans ces secteurs sont éligibles à l'échange de quotas lorsque leur consommation énergétique dépasse le seuil de 20MWTh. Ce seuil a été fixé par la Commission Européenne de façon à cibler les industries consommant le plus d'énergie lors des premières Phases du programme. Ce choix de couverture a été initialement justifié par le souci de la Commission Européenne de minimiser les résistances politiques pour une mise en place rapide, dès 2005, de l'EU ETS. Afin d'augmenter la performance environnementale du dispositif, le débat s'est ensuite porté sur une couverture plus large. La révision de la Directive de l'EU ETS a révélé que d'autres secteurs seront progressivement inclus, concernant l'aviation notamment dès 2013.

Allocation

L'objectif de réduction d'émissions de CO₂ de chaque Etat-Membre a été converti par un Plan National d'Allocation de Quotas (PNAQ). Chaque gouvernement est chargé de déterminer le montant de quotas à distribuer, après consultation des industries, et bien sûr après validation par la Commission Européenne. Le rôle de la DG Environnement est central dans ce dispositif, dans le but d'harmoniser les PNAQs entre les Etats-Membres, et de fournir des recommandations de plans d'allocation plus restrictifs. Les propositions de PNAQs peuvent être refusées par la Commission Européenne, et renvoyées aux Etats-Membres pour révision avant validation finale. La somme des PNAQs détermine le nombre total de quotas distribués aux installations dans l'EU ETS.

2.2 milliards de quotas par an ont été distribués sur la période 2005-2007. 2.08 milliards de quotas par an seront distribués sur la période 2008-2012, ce qui correspond à une allocation plus restrictive, étant donné le changement de périmètre du marché avec l'inclusion de nouveaux Etats-Membres. Les Figures 1 et 2 représentent, respectivement, la répartition des quotas (en millions de tonnes de CO₂) entre les Etats-Membres pour les périodes de conformité 2005-2007 et 2008-2012¹⁴. L'Allemagne, la Pologne, l'Italie, le Royaume-Uni et l'Espagne totalisent

¹⁴Ces données proviennent de la Mission Climat - Caisse des Dépôts, disponibles à l'adresse suivante : <http://www.caissedesdepots.fr>

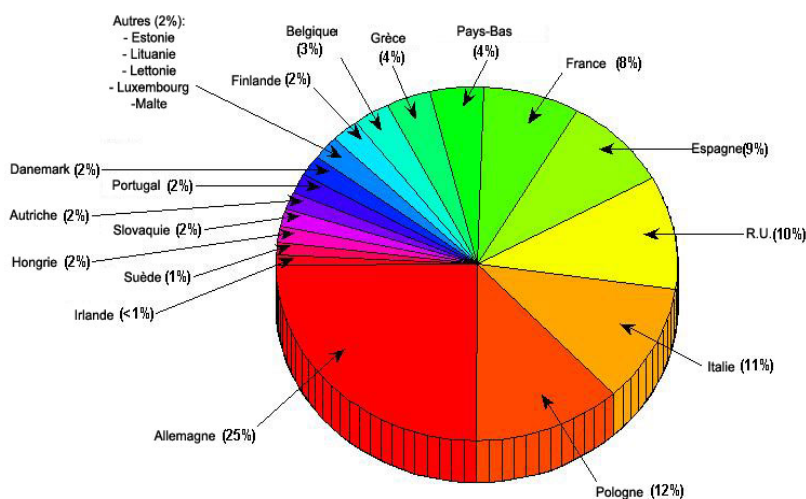


FIG. 1 – PNAQs I dans l'EU ETS (2005-2007) d'après le CITL (2007) et la Caisse des Dépôts (2006)

environ deux tiers de l'ensemble des quotas distribués.

La méthode de distribution des quotas choisie a été celle d'allocation suivant "les droits du grand père", c'est à dire de façon gratuite en proportion des émissions récentes. En supposant une valeur de 20 € par quota en moyenne, le lancement de l'EU ETS correspond à une création nette de valeur de l'ordre de 40 milliards €. La contrainte environnementale durant 2005-2007 n'ayant pas été perçue comme suffisamment forte par la plupart des observateurs de marché, la méthode d'allocation de quotas dans l'EU ETS a rapidement été critiquée pour sa distribution de rentes aux acteurs pré-existants sur le marché, dont certains peuvent faire des profits simplement en revendant leurs quotas non utilisés.

Sur la période 2005-2007, les quotas distribués ont plus que couvert les émissions vérifiées, avec un surplus cumulé net de 156 millions de tonnes. Ce surplus a cependant diminué d'année en année, passant de 83 millions de tonnes en 2005 à 37 millions de tonnes en 2006, et enfin 36 millions de tonnes en 2007. Les émissions ont crû de 0.4% en 2007 par rapport à 2006, et atteignent 2043 millions de tonnes pour 2080 millions de quotas distribués.

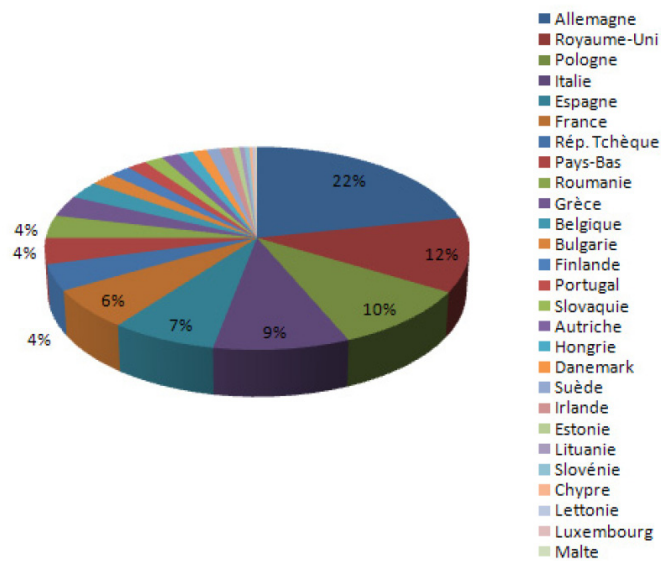


FIG. 2 – PNAQs II dans l’EU ETS (2008-2012) d’après le CITL (2008) et la Caisse des Dépôts (2008)

Calendrier

La Phase I de l’EU ETS, considérée comme une période de test, couvre la période 2005-2007. La Phase II correspond à la période d’engagement du Protocole de Kyoto, à savoir 2008-2012. La Phase III de l’EU ETS est censée correspondre à un accord post-Kyoto, soit 2013-2020. Au cours de chacune de ces Phases, la livraison de quotas est annualisée, et suit un calendrier précis :

- le 28 février de l’année N , les opérateurs européens reçoivent leurs quotas pour l’année de conformité N ;
- le 31 mars de l’année N est la date limite pour la soumission du rapport de vérification des émissions de l’année $N - 1$, par chaque installation auprès de la Commission Européenne ;
- le 30 avril de l’année N est la date limite pour la restitution des quotas utilisés par les opérateurs en $N - 1$;
- le 15 mai de l’année N correspond à la date limite pour la publication du rapport officiel de la Commission Européenne concernant la vérification des émissions de toutes les installations concernées par l’EU ETS en $N - 1$.

La fréquence annuelle de vérification des émissions, imposée par la Commission Européenne, correspond donc à un événement central, structurant la diffusion d'informations fiables au niveau agrégé sur le marché européen du carbone.

Echange de quotas

Un quota échangé dans l'EU ETS correspond à une tonne de CO₂ émise dans l'atmosphère, et est appelé *European Union Allowance* (EUA) en anglais. Les échanges de quotas sont enregistrés de façon électronique par l'intermédiaire de registres nationaux, que la Caisse des Dépôts administre pour la France par exemple. L'information contenue dans ces registres nationaux est centralisée par la Commission Européenne dans le registre européen appelé CITL, ou *Community Independent Transaction Log* en anglais¹⁵. Le CITL contient des informations exhaustives sur les émissions de CO₂ pour l'ensemble des installations couvertes par l'EU ETS, et est utilisé pour comptabiliser la position de conformité de chaque entreprise. Les informations contenues dans le CITL sont fournies installation par installation. Un traitement préalable d'agrégation des données s'avère nécessaire pour reconstituer les structures de propriété entre filiales et maison-mères, permettant d'accéder à une analyse plus fine pour l'évaluation du dispositif.

Pour être en conformité avec leur plafond d'émissions, les installations ont la possibilité d'échanger des quotas soit de gré-à-gré, soit à travers des courtiers ou des places de marché. *Bluenext*, anciennement appelé Powernext Carbon, est la place de marché dédiée aux échanges de quotas de CO₂ basée à Paris. L'*European Climate Exchange* est la place de marché basée à Londres, qui est leader en terme de produits dérivés. *NordPool* représente une place de marché commune aux pays nordiques (Danemark, Finlande, Suède, Norvège), basée à Oslo. Les prix des produits échangés sur ces places de marché sont fortement corrélés, ce qui apparaît conforme au fonctionnement d'autres places de marché, telles que les bourses européennes par exemple. Par ailleurs, le marché européen du carbone est caractérisé par une sophistication croissante des instruments financiers ayant comme actif sous-jacent

¹⁵Disponible à l'adresse suivante : <http://ec.europa.eu/environment/ets>

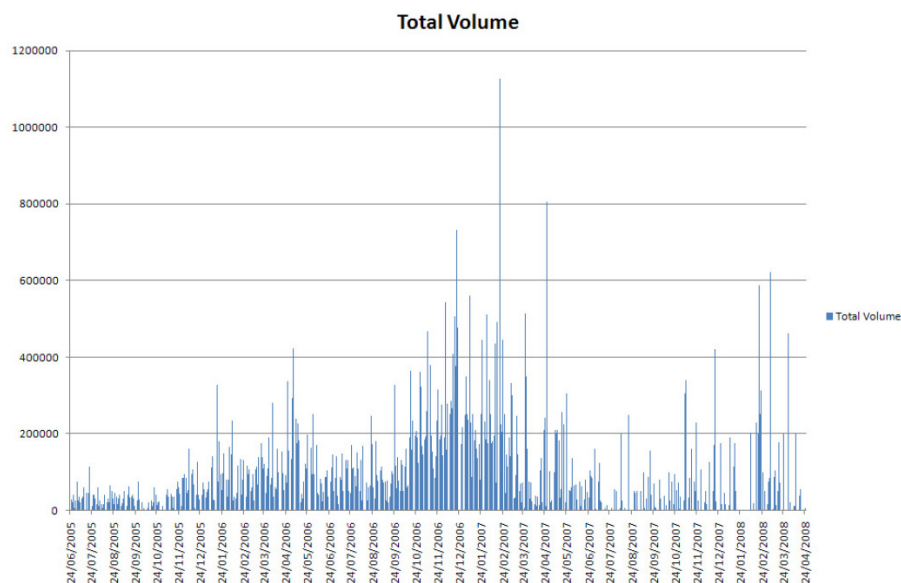


FIG. 3 – Volumes échangés du prix spot 2005-2007 entre le 24 juin 2005 et le 25 avril 2008 en tonnes de CO₂ d’après Bluenext

un quota de CO₂, avec le développement de prix d’options ou de swaps¹⁶.

La Figure 3 indique le volume total de quotas échangés dans l’EU ETS sur l’ensemble de la Phase I. Ce graphique révèle que le nombre de transactions a quadruplé entre 2005 et 2006, passant de 262 à 809 millions de tonnes. La liquidité croissante du marché a été confirmée en 2007, où le volume des transactions a été de 1.5 milliards de tonnes. Ce pic de transactions s’explique en partie par la croissance du nombre de contrats de Phase II, portant sur des dates de maturité entre Décembre 2008 et Décembre 2012, qui représentaient 4% du total des échanges en 2005, et 85% en 2007. Ces transactions atteignent 5.97 milliards € en 2005, 15.2 milliards € en 2006, et 24.1 milliards € en 2007, confirmant le fait que l’EU ETS constitue le marché de quotas le plus important au monde en date en terme de transactions.

¹⁶Notons qu’il existe également des instruments financiers ayant comme actif sous-jacent un crédit MDP sur le marché secondaire, issus du Protocole de Kyoto et fongibles avec les quotas échangés dans l’EU ETS à hauteur de 13.4% en moyenne

Transfert de quotas

Les quotas sont valides durant une année de conformité spécifique. Cependant, une installation peut avoir stocké des quotas durant l'année N pour couvrir ses émissions durant l'année $N + 1$, si les années N et $N + 1$ correspondent à la même Phase. Le même mécanisme s'applique dans le cas de quotas empruntés de l'année $N + 1$ en vue d'assurer la position de conformité de l'installation durant l'année N . Les quotas stockés ou empruntés sont donc fongibles à l'intérieur d'une même Phase. En revanche, les quotas émis durant la Phase I ont été déclarés non valides durant la Phase II. Les quotas des Phases II et III sont fongibles entre les différentes périodes d'engagement.

Pénalités

Durant 2005-2007, si une installation ne respecte pas son plafond d'émissions sur la période de conformité considérée, la pénalité est fixée à hauteur de 40 €/tonne en excès, plus la restitution d'un quotas lors de la période d'engagement suivante. Durant 2008-2012, ce montant correspond à 100 €/tonne, suivant le même principe.

Cette description dans les grandes lignes du contexte institutionnel européen des programmes de lutte contre le réchauffement climatique nous amène naturellement à préciser la problématique autour de laquelle s'articule le présent travail.

Problématique

L'Union Européenne s'étant mise à l'avant-garde de la régulation environnementale en matière de politique climatique, cette thèse consiste à évaluer les règles de fonctionnement du marché européen du carbone durant la Phase I. Nous cherchons à établir quel a été le rôle joué par le régulateur, parmi ses choix de création du marché de permis, sur les comportements des firmes. Ainsi, notre travail vise à contribuer à la littérature sur la "naissance" du marché européen du carbone, en mettant l'accent sur l'étude de quelques caractéristiques clés dans un contexte institutionnel mouvant, et en identifiant des effets d'apprentissage.

Il s'agira tout d'abord d'examiner les effets du stockage et de l'emprunt de permis. Nous utiliserons une approche à la fois conceptuelle, pour en rappeler les principaux effets environnementaux et économiques, et résolument empirique, de façon à asseoir statistiquement les effets précédemment identifiés des règles de fonctionnement adoptées sur l'EU ETS.

Nous étudierons ensuite les fondamentaux du prix du quota, en lien avec les décisions du régulateur concernant l'allocation initiale. La décision de créer un quota de CO₂ donne lieu à des stratégies de valorisation par les firmes en fonction des interactions avec les marchés des énergies. Nous mettrons également en évidence l'importance des événements climatiques dans la détermination du prix du CO₂, ainsi que le rôle joué par la variation de la production industrielle dans les secteurs couverts par l'EU ETS.

Nous utiliserons enfin des méthodes originales afin d'inférer l'aversion au risque sur le marché du carbone, et d'identifier la façon dont les firmes réagissent en présence de l'incertitude sur la variation des décisions politiques. Cette dernière étude nous permettra de faire le lien avec le rôle joué par le stockage de permis, ainsi qu'avec les stratégies de gestion des risques précédemment identifiées.

Au total, ce travail de recherche est composé de trois chapitres. Ces chapitres suivent les objectifs décrits ci-dessus, et ne sont pas indépendants, dans la mesure où la réflexion sur l'évaluation du dispositif se nourrit des éléments progressivement mis en évidence. Le plan adopté est le suivant :

Le Chapitre 1 expose les propriétés théoriques des mécanismes de stockage et d'emprunt sur un marché de permis. Nous rappelons sous quelles conditions le choix du régulateur devrait consister à autoriser le stockage de permis, et restreindre l'emprunt de permis par l'adoption d'un taux d'échange inter-temporel non unitaire. La première décision est due au fait que le stockage de permis permet aux firmes de lisser leurs émissions dans le temps, et leur offre davantage de flexibilité pour être en conformité avec la cible d'émissions. La seconde décision est liée au fait que l'emprunt de permis peut conduire à des concentrations des émissions sur les périodes initiales du programme, lorsque les firmes avec des coûts d'abattement élevés sont incitées à retarder des investissements dans des

équipements de dépollution. Ces premiers éléments nous renseignent sur le potentiel des mécanismes de stockage et d'emprunt de permis à atteindre leurs objectifs en terme d'efficience, si ces outils sont correctement configurés par le régulateur, et dont les effets ont été entièrement compris, évalués et discutés. Cette revue théorique des propriétés des mécanismes de stockage et d'emprunt de permis nous amène ensuite à examiner les provisions adoptées durant l'EU ETS. La Phase I est caractérisée par une flexibilité inter-temporelle complète, tout comme les Phases II et III. Du fait de la simultanéité des périodes d'engagement entre le Protocole de Kyoto et la Phase II, le transfert inter-temporel de quotas a cependant été strictement limité entre les Phases I et II. Dans ce contexte, nous étudions les effets de la restriction du transfert de quotas inter-périodes sur le développement du prix du CO₂ durant 2005-2007. Nos résultats confirment statistiquement l'hypothèse selon laquelle la déconnexion entre les prix de Phase I, décroissants asymptotiquement vers zéro, et les prix de Phase II, stabilisés autour de 20 €/tonne, s'explique par les restrictions sur le transfert de quotas inter-périodes mises en place durant la Phase I. En lien avec notre problématique, nous sommes alors capables d'identifier des effets d'apprentissage institutionnel entre les Phases I et II, les erreurs de jeunesse ayant été commises entre 2005 et 2007 ne semblant pas avoir été répétées pour les périodes ultérieures.

Le Chapitre 2 est consacré aux fondamentaux du prix du CO₂. Ceux-ci sont liés principalement aux prix des énergies et aux évènements climatiques extrêmes. Nous développons une méthode originale pour mettre en évidence plusieurs changements de structure dans la série de prix du CO₂ durant 2005-2007. Ces ruptures sont liées aux évènements annuels de conformité, et aux communications officielles de la Commission Européenne. Nous montrons que l'influence des fondamentaux liés aux prix des énergies et aux variables de températures varie avant et après les périodes de changement structurel précédemment identifiées. Notre étude valide donc l'idée selon laquelle les fondamentaux du prix du CO₂ sont principalement liés aux interactions avec les prix des énergies et les températures, mais que cette influence varie dans le temps, et peut quelquefois être éclipsée par des changements d'anticipations majeurs des opérateurs de marché dûs aux évènements institution-

nels. Ces premières conclusions nous conduisent à l'identification d'autres fondamentaux du prix du CO₂ ayant été suggérés jusqu'à présent dans la littérature professionnelle. Nous mettons statistiquement en évidence le rôle joué par la variation de la production industrielle dans les secteurs couverts par l'EU ETS sur les changements de prix du CO₂. La production industrielle est utilisée ici en tant que mesure de l'évolution de l'activité économique, qui constitue donc un autre déterminant du prix du CO₂ dans trois des neuf secteurs couverts par l'EU ETS. Ces secteurs sont ceux de la production d'électricité, de la production de fer et d'acier, et de la production de pulpe et de papier. Nous menons une analyse par décomposition pour dériver ces résultats. En effet, nous basons notre compréhension du fonctionnement du marché européen du carbone sur le rôle central joué par la position de conformité. Selon qu'une installation se retrouve dans une position nette courte ou longue de permis, celle-ci adoptera une position d'acheteuse ou de vendeuse nette de permis sur le marché. En conjonction avec ces effets dus à l'allocation, nous introduisons des pics de production spécifiques à l'évolution de la production industrielle dans les secteurs considérés, et qui sont également censés impacter les changements de prix du CO₂. Cette analyse par décomposition montre que les effets de l'allocation et des pics de production sont statistiquement significatifs dans l'explication des changements de prix du CO₂. Cette analyse permet également de souligner le rôle prédominant joué par l'allocation sur l'effet de pic de production en tant que fondamental du prix du CO₂. Nous étendons enfin nos résultats par pays, et soulignons le rôle central joué par les producteurs électriques allemands dans l'EU ETS.

Le Chapitre 3 traite des stratégies de gestion des risques mises en place par les firmes. Ce Chapitre s'appuie sur les développements précédents pour effectuer dans un premier temps une analyse du changement de l'aversion au risque des investisseurs sur le marché européen du carbone aux alentours de l'évènement de conformité 2006. Cette étude est basée sur une méthode existante pour les marchés d'actions, et qui s'est révélée robuste pour quantifier les changements d'anticipations des investisseurs. Etant donné le rôle central joué par l'évènement de conformité 2005 que nous avons mis en évidence dans le Chapitre 2, notre étude

se concentre sur l'évènement de conformité 2006, qui constitue le seul évènement empiriquement observable. Nous montrons que le risque sur le marché du CO₂ est lié à une augmentation du prix du quota après l'évènement de conformité 2006. Ce résultat est très différent des résultats habituellement obtenus sur les marchés d'actions, et révèle que les investisseurs anticipent une rareté croissante de quotas sur le moyen terme, en conformité avec la restriction des critères de validation des PNAQs II mise en place par la Commission Européenne. Nos résultats soulignent enfin que l'aversion au risque est plus importante sur le marché émergent du carbone que sur les marchés d'actions sur la période considérée, ce qui confirme l'idée selon laquelle les anticipations ne sont pas encore homogènes sur ce marché. Avec le début de la Phase II sur des bases institutionnelles plus solides, l'aversion au risque sur le marché européen du carbone devrait progressivement se rapprocher des valeurs trouvées sur les marchés d'action. Ensuite, nous utilisons le développement du Chapitre 1, consacré aux propriétés des mécanismes de stockage de permis, pour étudier leur impact en tant qu'outil de gestion des risques. Plus précisément, nous supposons que l'échange de permis entre firmes a déjà eu lieu, et que celles ci utilisent le stock de permis restant pour s'assurer contre des variations des décisions politiques du régulateur, concernant les règles d'allocation par exemple. Nous montrons que le stockage de quotas peut être utilisé par les firmes en présence d'une augmentation du risque concernant la quantité de permis disponibles. De plus, nous identifions une règle optimale de partage des risques par une agence, qui apparaît valide dans le cas où la dotation de permis sur l'ensemble des périodes est connue. En présence d'incertitude sur le montant de permis distribués durant la période suivante de conformité, nous montrons que l'agence peut intervenir pour mutualiser les risques entre firmes et lisser leurs émissions, en prenant en compte la sensibilité de la productivité marginale par rapport à la variable environnementale. Finalement, ces résultats sont discutés dans le contexte de l'EU ETS pour détailler le comportement de stockage au niveau de l'installation, et le comportement de mutualisation des risques liés à l'échange de quotas entre maisons-mères et filiales. Cette approche est simplement descriptive, et ouvre des perspectives de recherche.

Présentation de la base de données commune aux Chapitres 1 et 2

La base de données commune aux Chapitres 1 et 2 provient de la Mission Climat - Caisse des Dépôts. Les prix des énergies et les variables de températures, détaillés ci-dessous, sont publiés dans le bulletin mensuel *Tendances Carbone*¹⁷.

Prix du carbone

Etant principalement intéressés par les caractéristiques institutionnelles de l'EU ETS durant la Phase I¹⁸, nous conduisons une analyse du prix spot du CO₂ qui reflète les besoins courants d'émissions. Les installations n'ayant pas *a priori* un besoin quotidien ou intra-quotidien de quotas mais un besoin *annuel* de façon à assurer leur conformité avec les émissions vérifiées, nous utilisons la série mensuelle de prix spot du CO₂ comme variable expliquée¹⁹ et les séries de prix futures des énergies avec une échéance à un mois²⁰.

¹⁷Disponible à l'adresse : <http://www.caissedesdepots.fr/spip.php?article649>

¹⁸C'est à dire, les quotas qui doivent être utilisés pour assurer la conformité des installations jusqu'au 31 Décembre 2007.

¹⁹Ce choix dans la fréquence de la série temporelle du CO₂ nous semble mieux refléter les changements dans les anticipations des industriels que la série de prix quotidienne ou intra-quotidienne.

²⁰Ce choix reflète également le fait que la plupart des besoins d'énergie sont remplis par des contrats forward.

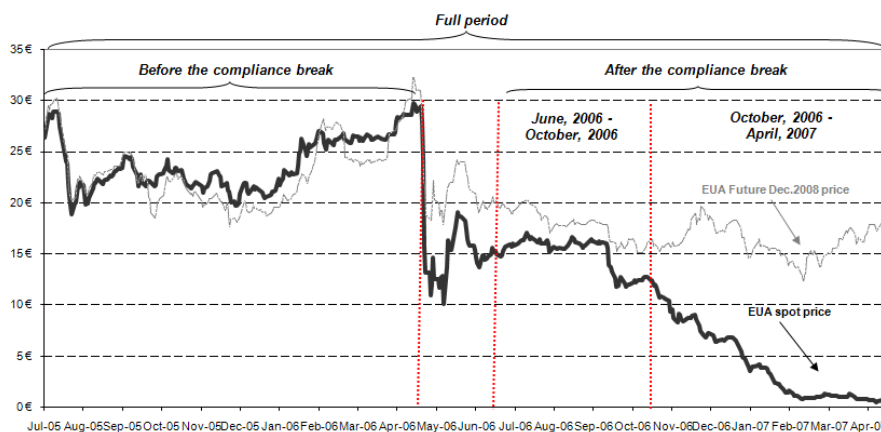


FIG. 4 – Evolution du prix du CO₂ entre le 1er Juillet 2005 et le 30 Avril 2007 d'après Bluenext

Le prix du carbone est déterminé sur plusieurs marchés, c'est à dire de gré-à-gré, sur les marchés spots et futures. Le marché le plus liquide est le marché de gré-à-gré. Les transactions sur ce marché sont opérées par des courtiers ou des industriels. Les données concernant les prix sont confidentielles ou disponibles à travers des cabinets de consultants en énergie. Le marché futures le plus liquide est l'European Climate Exchange et le marché spot le plus liquide Bluenext. Nous utilisons la série du prix du CO₂ (P_t en €/tonne de CO₂) négociée du 1er Juillet 2005 au 30 Avril 2007 sur Bluenext²¹. Notre échantillon commence avec le lancement de la place de marché Bluenext et s'arrête à une période où le prix du CO₂ tend vers zéro (voir Figure 4).

²¹Anciennement appelé Powernext Carbon.

Prix des énergies

Nous utilisons les séries temporelles du prix des énergies suivantes. Le prix du brent (*brent* en \$ / baril) est le prix quotidien à échéance à un mois du pétrole brut négocié sur l'Intercontinental Futures Exchange (ICE). Dans le but d'utiliser des séries de prix avec la même devise, nous avons converti la série de prix du brent en € en utilisant le taux de change quotidien fourni par la Banque Centrale Européenne. Le gaz naturel (*ngas* en €/MWh) est le prix quotidien du gaz naturel à échéance à un mois négocié sur Zeebrugge Hub. Le prix du charbon (*coal* en €/tonne) est le prix quotidien à échéance à un mois CIF ARA²².

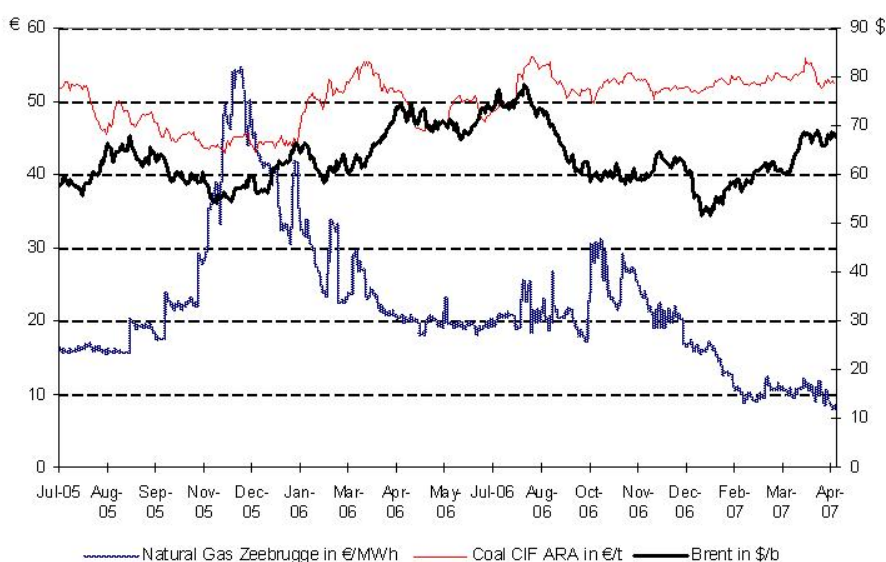


FIG. 5 – Séries de prix d'échéance à un mois du Brent ICE, du gaz naturel Zeebrugge, du charbon CIF ARA entre le 1er Juillet 2005 et le 30 Avril 2007 d'après Reuters

Comme l'indique la Figure 5, sur la période 2005-2007 la série de prix du gaz naturel est caractérisée par un niveau de volatilité plus élevé que la série de prix

²²CIF ARA signifie que le prix du charbon incluant les frais de transport et d'assurance délivré dans les principaux ports du nord ouest de l'Europe, tels qu'Amsterdam, Rotterdam ou Antwerp.

du charbon. Pendant les mois de Novembre-Décembre 2005, la série de prix du gaz naturel a fortement augmenté aux alentours de 50 €/MWh, pour ensuite décliner à 20 €/MWh pendant 2006 et 10 €/MWh durant le premier trimestre 2007. La compétitivité du gaz naturel par rapport au charbon s'est améliorée entre le début de l'année 2006 et le premier trimestre 2007 comparée à la fin de l'année 2005.

Le prix de l'électricité (*elec* en €/MWh) est le prix en base²³ d'échéance à un mois échangé sur Bluenext. Dans le but de prendre en compte les options d'abattement pour les sources d'énergies utilisées par les industriels et le prix relatif des prix du combustible, trois indicateurs de rentabilité spécifiques sont inclus²⁴. Premièrement, le Clean Dark Spread (*clean dark spread* exprimé en €/MWh) représente la différence entre le prix de l'électricité lors des périodes de pointe et le prix du charbon utilisé pour générer cette électricité, corrigé du niveau de production énergétique de l'usine fonctionnant au charbon et des coûts liés au CO₂ :

$$\text{clean dark spread} = \text{elec} - \left(\text{coal} * \frac{1}{\rho_{\text{coal}}} + p_t * EF_{\text{coal}} \right) \quad (1)$$

avec ρ_{coal} l'efficacité de conversion thermique d'une centrale standard au charbon²⁵, et EF_{coal} le facteur d'émission de CO₂ d'une centrale standard au charbon²⁶.

Deuxièmement, le Clean Spark Spread (*clean spark spread* exprimé en €/MWh) représente la différence entre le prix de l'électricité lors des périodes de pointe et le prix du gaz naturel utilisé pour générer cette électricité, corrigé du niveau de production énergétique de l'usine fonctionnant au gaz naturel et des coûts liés au CO₂ :

$$\text{clean spark spread} = \text{elec} - \left(\text{ngas} * \frac{1}{\rho_{\text{ngas}}} + p_t * EF_{\text{ngas}} \right) \quad (2)$$

²³A distinguer du prix en pointe.

²⁴Ces indicateurs de rentabilité sont calculés par la Caisse des Dépôts-Mission Climat pour Tendances Carbone. La méthodologie est disponible à l'adresse : http://www.caissedesdepots.fr/IMG/pdf_Document_Methodologie_Tendances_Carbone_FR_V4.pdf

²⁵c'est-à-dire 40% d'après le rapport 2005 de la NEA/IEA intitulé *The Projected Costs of Generating Electricity*.

²⁶c'est-à-dire 0.86 tCO₂/MWh d'après la même source que précédemment.

avec ρ_{ngas} l'efficacité de conversion thermique d'une centrale standard au gaz²⁷, et EF_{ngas} le facteur d'émission de CO₂ d'une centrale standard au gaz²⁸.

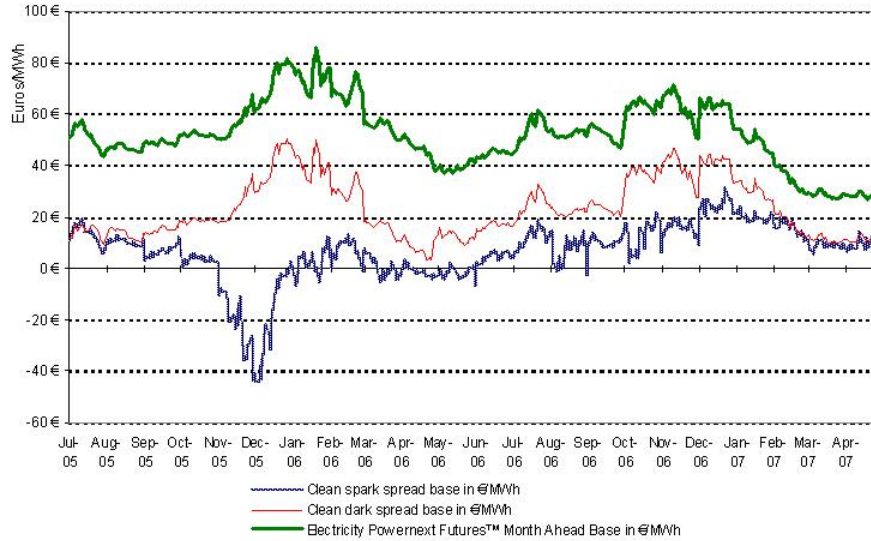


FIG. 6 – Séries de prix de l'électricité d'échéance à un mois sur Bluenext, *clean spark spread* et *clean dark spread* entre le 1er Juillet 2005 et le 30 Avril 2007 d'après Bluenext, Tendances Carbone pour la Caisse des Dépôts

Comme l'indique la Figure 6, durant 2005-2006 l'utilisation du charbon est apparue plus profitable que le gaz naturel. Au début de l'année 2007, la différence entre le *clean dark spread* et *clean spark spread* s'est réduite. Cette situation encourage les producteurs d'électricité à diminuer l'usage de charbon au profit de gaz naturel.

Troisièmement, le prix de bascule du CO₂ (*switch* exprimé en €/MWh) est utilisé comme une variable d'approximation des coûts d'abattement :

$$switch = \frac{cost_{ngas}/MWh - cost_{coal}/MWh}{tCO2_{coal}/MWh - tCO2_{ngas}/MWh} \quad (3)$$

avec $cost_{ngas}$ le coût de production d'une MWh d'électricité sur la base des émissions nettes de CO₂ du gaz en €/MWh, $cost_{coal}$ le coût de production d'une

²⁷c'est-à-dire 55% d'après la même source que précédemment.

²⁸c'est-à-dire 0.36 tCO₂/MWh d'après la même source que précédemment.

MWh d'électricité sur la base des émissions nettes de CO₂ du charbon en €/MWh, $tCO2_{coal}$ les émissions de CO₂ d'une centrale standard de charbon par MWh d'électricité, et $tCO2_{ngas}$ les émissions de CO₂ d'une centrale standard de gaz par MWh d'électricité comme indiqué ci-dessus.

D'après la Figure 7, au mois de Juillet 2005 et au début du mois de Février 2007 les séries de prix spot du CO₂ et le prix *switch* ont été très proches, ce qui suggère qu'à ces niveaux de prix du CO₂ des mesures d'abattement d'émissions sont susceptibles d'avoir eu lieu.

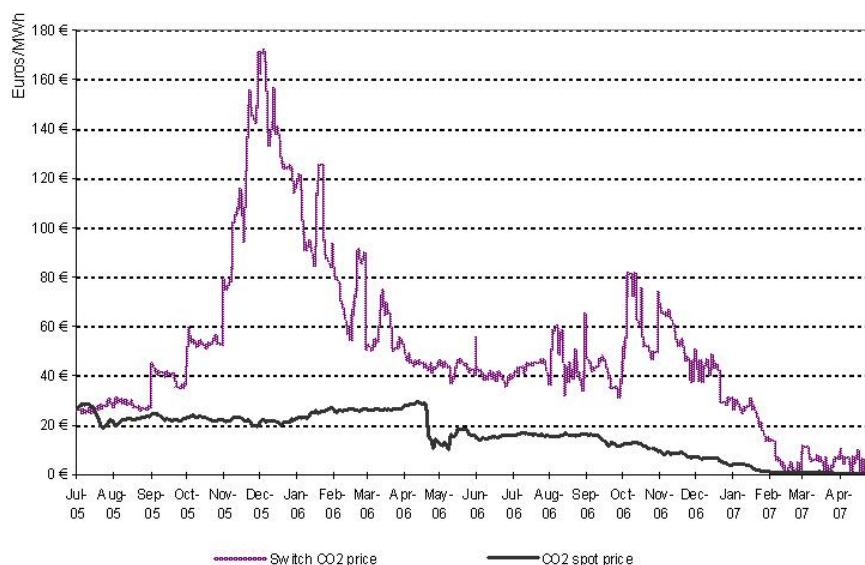


FIG. 7 – Série de prix spot du CO₂ et prix *switch* entre le 1er Juillet 2005 et le 30 Avril 2007 d'après Bluenext, Tendances Carbone pour la Caisse des Dépôts

Nous pouvons écarter la présence d'endogénéité entre les variables de prix de l'énergie d'après les arguments suivants. En Europe, le marché du gaz naturel est caractérisé par des contrats de long-terme d'une durée de 20 à 25 ans²⁹. De même, le charbon fait l'objet de contrats de long-terme (Joskow (1990)). Etant donné que ces contrats sont établis sur le long terme et qu'ils n'ont pas les mêmes

²⁹Par exemple, 86% de la consommation de gaz naturel en France est couverte par des contrats de long-terme (MEDAD (2007)). Voir Brown et Yucel (2008) pour une discussion détaillée des fondamentaux du prix du gaz naturel.

fondamentaux, ils n'apparaissent pas endogènes avec la détermination des autres prix de l'énergie tels que le prix de l'électricité inclus dans notre modèle³⁰.

Les tests usuels de racine unitaire (ADF, PP, KPSS) ont été appliqués. Toutes les séries temporelles sont caractérisées par l'absence de racine unitaire en différence première logarithmique. En d'autres termes, toutes les séries temporelles non différenciées sont intégrées d'ordre 1 (I(1)).

En suivant l'approche d'Helfand et al. (2006), les variables des prix de l'énergie sont construites en calculant des erreurs de prévision à un pas pour toutes les séries de prix. De cette façon, nous cherchons à capturer l'incertitude liée à l'évolution du marché et à modéliser l'arrivée d'informations nouvelles venant de changements inattendus des conditions de marchés qui peuvent affecter le prix du CO₂.

Variables de températures

D'après la littérature existante, nous axons notre étude sur la dimension la plus importante du climat, à savoir les jours particulièrement chauds et froids. L'influence des précipitations, de l'éolien et d'autres conditions climatiques sur la demande d'énergie est laissée de côté pour de futures recherches car nous ne disposons pas de données suffisantes au niveau européen pour les prendre en compte dans cette étude. Les variables de températures sont construites en utilisant les données quotidiennes des indices Bluenext Weather (exprimées en °C) dans quatre pays : l'Espagne, la France, l'Allemagne et le Royaume-Uni. Ces indices sont calculés comme la température moyenne au niveau de la station météorologique représentative de chaque région, pondérée par la population régionale :

$$\Theta = \frac{\sum_{i=1}^N pop_i * \Theta_i}{\sum_{i=1}^N pop_i} \quad (4)$$

avec N le nombre de régions dans le pays considéré, pop_i la population de la région i , et Θ_i la température moyenne de la région i sur le mois considéré en °C.

³⁰Voir Chevalier et Percebois (2008) pour une étude détaillée de ces fondamentaux.

L'index européen de températures publié par Tendances Carbone³¹ est également utilisé. Celui-ci est égal à la moyenne des indices des températures nationales fournies par Bluenext pondérée par la part de chaque PNAQ pour chacun des quatre pays cités précédemment :

$$T = \frac{\sum_{j=1}^4 Q_j * \Theta_j}{\sum_{j=1}^4 Q_j} \quad (5)$$

avec Q_j le nombre de quotas alloués par le PNAQ dans le pays j , et Θ_j l'indice national de température du pays j . La part nationale de l'allocation durant la Phase I dans l'allocation totale en EUAs est égale à 14.55% pour la France, 46.40% pour l'Allemagne, 22.82% pour le Royaume-Uni, et 16.23% pour l'Espagne, d'après la Commission Européenne.

Ensuite, pour chacune de ces cinq séries de températures, la déviation par rapport à la moyenne saisonnière est calculée³². Nous obtenons de cette façon deux variables quantitatives de températures : la valeur des températures, et la déviation de leur moyenne saisonnière exprimée en valeur absolue.

Pour prendre en compte les conditions de températures extrêmes, deux types de variables dummy sont calculées. Premièrement, suivant Mansanet-Bataller et al. (2007), nous calculons les quintiles à partir des séries de températures. Nous utilisons les quintiles supérieurs et inférieurs pour construire deux variables dummy représentant les jours extrêmement chauds et froids, notés respectivement *Tempext5* et *Tempext95*. Deuxièmement, nous utilisons une approche différente par rapport à la littérature existante en construisant des variables dummy représentant des évènements extrêmes spécifiques en base mensuelle qui sont susceptibles d'impacter les changements de prix du CO₂. En calculant et en comparant pour chaque pays la moyenne des températures mensuelles sur toute la durée de notre échantillon et sa déviation par rapport à la moyenne saisonnière, nous avons sélectionné les évènements extrêmes suivants comme variables dummy : Juillet 2005 (saison anormalement chaude en Espagne), Janvier - Février 2006 (un hiver relativement froid

³¹Cet indice est calculé par la Caisse des Dépôts-Mission Climat. La méthodologie est disponible à l'adresse : http://www.caissedesdepots.fr/IMG/pdf_Document_Methodologie_Tendances_Carbone_FR_V4.pdf

³²Les moyennes saisonnières sont calculées entre 1986 et 2007.

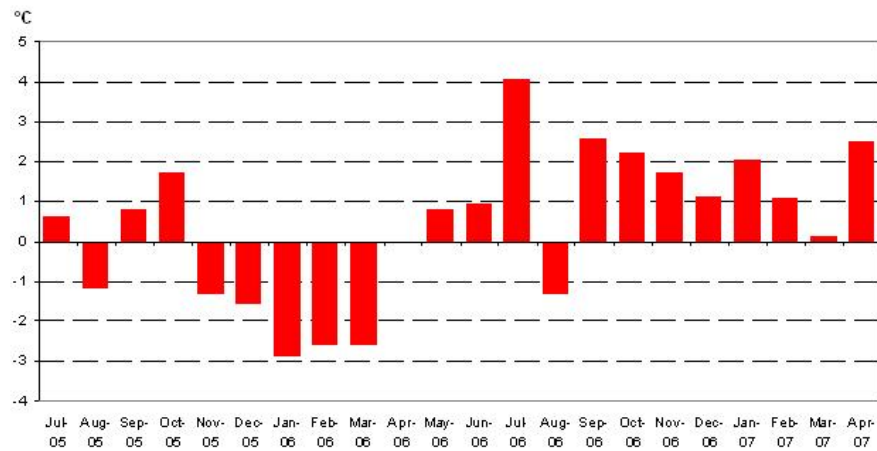


FIG. 8 – Index européen de températures de Juillet 2005 à Avril 2007 d’après Bluenext et Tendances Carbone de la Caisse des Dépôts

en Europe), Juillet 2006 (relativement chaud en Europe), Septembre - Octobre 2006 (plus chaud que la moyenne saisonnière) et Janvier - Février 2007 (un hiver plus chaud que la moyenne saisonnière). La Figure 8 fournit une représentation de ces évènements de températures. Nous cherchons de cette manière à tester la non linéarité de la relation entre les températures et les changements du prix du CO_2 ³³. Nous utilisons les évènements climatiques extrêmes cités précédemment, les séries de températures et leur déviation en valeur absolue par rapport à la moyenne saisonnière pour spécifier l’effet des températures durant les évènements extrêmes. En particulier, deux variables d’interaction sont calculées : les produits croisés entre les cinq variables dummies des évènements climatiques extrêmes et, soit la série de températures, soit la déviation en valeur absolue par rapport à la moyenne saisonnière. Par exemple, $Win06 = winter2006 * Temp_AbsDeviation$ est le produit de la variable dummy caractéristique de Janvier-Février 2006 ($winter2006$) et la valeur absolue de la déviation par rapport à sa valeur moyenne dans l’index de températures européen ($Temp_AbsDeviation$). Notons que ce dernier type de va-

³³Notons qu’il existe des modélisations visant à rendre compte de ces linéarités, tels que les modèles à seuil qui apparaissent pertinents dans ce type d’étude, mais qu’il ne nous appartient pas de développer plus en détails ici.

riable d'interaction peut être interprété comme des changements de températures non-anticipés.

Chapitre 1

Le rôle du stockage et de l'emprunt de quotas

Introduction

Sur un marché de permis, l'introduction des mécanismes de stockage et d'emprunt réduisent les coûts globaux de mise en conformité par l'intermédiaire de la flexibilité intertemporelle. Le Chapitre 1 s'intéresse aux enjeux économiques liés à l'autorisation du stockage et de l'emprunt lors de la création du marché de permis par le régulateur.

Premièrement, nous proposons une revue de littérature des propriétés théoriques du stockage et de l'emprunt de permis. Les études théoriques s'accordent sur le fait que, quand ces mécanismes sont correctement mises en oeuvre, l'autorisation du stockage et de l'emprunt permet de réduire les coûts des politiques climatiques.

Deuxièmement, nous détaillons les règles de fonctionnement adoptées dans l'EU ETS. Dans ce cadre, nous testons la relation empirique entre les changements de prix spot du CO_2 durant 2005-2007 et la restriction sur le transfert de quotas inter-périodes mise en place à la fin de la Phase I, entre le 31 décembre 2007 et le 1er janvier 2008. En effet, le prix des quotas européens de CO_2 a décliné à des niveaux bien inférieurs à ceux qui avaient été anticipés durant la Phase I (2005-2007). La littérature existante identifie parmi les principales explications

des présomptions de sur-allocation, des efforts d'abattement précoces en 2005, et probablement des coûts d'abattement décroissants en 2006. Nous montrons que les faibles niveaux de prix de CO_2 s'expliquent également par l'intermédiaire des restrictions sur le stockage inter-périodes mises en place entre 2007 et 2008, et qui ont empêché l'émergence d'un signal prix efficient dans l'EU ETS. Basée sur une étude à la Hotelling, nos résultats suggèrent que les prix spots du CO_2 ne répondent pas aux conditions d'équilibre du marché inter-temporel de quotas à cause d'une allocation sous-optimale durant la Phase I. De plus, nous prouvons statistiquement que, durant la négociation des PNAQs II, les décisions de la France et de la Pologne de bannir le transfert de quotas inter-périodes contribuent à l'explication de prix bas du CO_2 à la fin de la Phase I. Enfin, nous montrons que la relation *cost-of-carry* entre les prix spot du CO_2 et les futures de maturité durant la Phase II n'est plus respectée *après* la mise en place des restrictions sur le transfert de permis inter-périodes. Cette situation peut être interprétée comme un sacrifice des mécanismes de flexibilité inter-temporelle offerte aux industriels durant la Phase I, de façon à intégrer progressivement les règles de fonctionnement du marché de quotas, et à atteindre un développement du prix efficient et des efforts d'abattement effectifs durant la Phase II.

1.1 Stockage et emprunt de quotas : une revue de littérature de la modélisation économique, des règles de fonctionnement actuelles et des perspectives de réforme

Sur un marché de permis d'émissions négociables, le stockage (*banking* en anglais) réfère à la possibilité pour les agents de conserver des permis non-utilisés pour une utilisation future, tandis que l'emprunt (*borrowing* en anglais) représente la possibilité d'utiliser des permis durant la période présente à partir de leur allocation future. En permettant aux agents d'arbitrer entre leurs coûts d'abattement actuels et anticipés sur plusieurs périodes, le stockage et l'emprunt de permis constituent

une dimension supplémentaire de la flexibilité : les agents peuvent échanger des permis non seulement dans l'espace, mais aussi inter-temporellement. De telles règles de fonctionnement permettent aux agents de lisser leurs flux d'émissions dans le temps, et ont joué un rôle important dans le succès¹ du marché du SO₂ aux Etats-Unis (Ellerman et al. (2000)). De façon surprenante, la question du stockage et de l'emprunt de permis a été peu débattue lors de l'instauration de politiques de lutte contre le changement climatique tel que le Protocole de Kyoto² (Stavins (1998)). Les mécanismes de stockage et d'emprunt de plusieurs marchés de permis sont rappelés dans le Tableau 1.2. Nous détaillons dans la Section 1.2.1 les règles spécifiques à l'EU ETS.

Nous effectuons dans cette première section un rappel théorique des différents effets du stockage et de l'emprunt à prendre en considération lors de la création d'un marché de permis. La littérature existante décrit de façon exhaustive les avantages et les inconvénients des mécanismes de stockage et d'emprunt. D'une part, le stockage donne à la firme l'incitation à aller au-delà de sa position de conformité, et à réallouer inter-temporellement ses émissions, de façon à diminuer les dommages sociaux. D'autre part, l'emprunt donne aux firmes avec de forts coûts d'abattement l'incitation à retarder des investissements dans des technologies plus propres, en empruntant par rapport aux périodes futures et en concentrant leurs émissions sur les premières périodes. Tandis que l'allocation totale de permis détermine la valeur présente actualisée du prix du permis, nous rappelons que celui-ci peut être affecté par l'introduction d'un ratio d'échange inter-temporel entre les permis stockés et empruntés.

¹La notion de succès peut être interprétée selon de nombreux effets (par comparaison avec l'arsenal législatif pré-existant, en terme d'innovation ou de diffusion technologique, de réduction de l'incertitude législative, d'économie de coûts globaux, etc.). Nous concentrons notre analyse sur la capacité du prix du permis à refléter correctement les anticipations des agents à travers la structure par terme des prix spot et futures.

²Les mécanismes de stockage ont été clairement définies selon les types de crédits (voir Tableau 1.1). Les mécanismes d'emprunt par contre ont seulement été définis dans le paragraphe II.XV du rapport de l'UNFCCC (2000). D'après Newell et al. (2005), l'emprunt de permis a été inclus de façon implicite, par l'intermédiaire du paiement de pénalités liées aux tonnes de CO₂ émises en surplus du plafond d'émissions.

Nous adressons la question centrale suivante : quelles leçons pouvons nous tirer de la littérature existante concernant l'utilisation du stockage et de l'emprunt sur les marchés de permis négociables ? Notre priorité consiste à détailler les effets du stockage et de l'emprunt concernant son potentiel de réduction / d'aggravation des dommages environnementaux. Nous détaillons tout d'abord les effets économiques et environnementaux du stockage et de l'emprunt de permis, puis nous passons en revue la littérature existante décrivant leurs propriétés théoriques.

1.1.1 Les effets environnementaux et économiques du stockage et de l'emprunt de permis

Un marché de permis avec une flexibilité inter-temporelle complète est dit supérieur, en terme d'efficience, à un marché où le transfert de permis est restreint, à la fois des points de vue environnemental et économique. D'après Haites (2006), les mécanismes de stockage affectent principalement la performance environnementale, l'efficience économique et le comportement des opérateurs de marché. La décision du régulateur concernant l'autorisation du stockage et de l'emprunt de permis est donc susceptible de créer les effets listés ci-dessous.

En terme d'effets environnementaux, le stockage et l'emprunt de permis changent le profil temporel des émissions et des émissions agrégées, avec des effets potentiels sur la santé publique. Tandis que le stockage *réduit* les dommages sociaux en présence d'une fonction de dommage convexe venant des émissions et de plafonds futurs d'émissions plus stricts (Kling et Rubin (1997)), l'*emprunt non-restreint* a des conséquences *négatives*, avec une concentration des émissions sur les premières périodes et un retard dans les décisions d'abattement. Pour corriger ces effets potentiellement négatifs, le régulateur peut introduire un ratio d'échange intertemporel non-unitaire incluant des intérêts sur le stockage et décourageant l'emprunt : si les firmes empruntent beaucoup de permis lors de la période initiale, elles devront rembourser plus de permis qu'elles n'en ont effectivement utilisées lors de la période suivante (Kling et Rubin (1997), Leiby et Rubin (2001)). De plus, les

mécanismes de stockage affectent le taux de non-conformité³.

En terme d'effets économiques, la littérature théorique suggère que le stockage et l'emprunt peuvent améliorer l'efficacité économique sous certaines hypothèses⁴. Premièrement, le stockage relie les prix spot et futures du permis tel qu'expliqué par Maeda (2004). Deuxièmement, le stockage et l'emprunt renforcent la stabilité du prix du permis (Ellerman et Montero (2007)). Si le stockage inter-périodes n'est pas autorisé, le prix du permis est plus volatile à la fin de chaque période de conformité. En cas de surplus, les permis n'ont plus de valeur et leur prix tombe à zéro. En cas de déficit, le prix du permis augmente fortement à la fin de la période. L'autorisation du stockage inter-périodes devrait donc permettre de diminuer de telles fluctuations de prix à la fin de la période⁵. Troisièmement, le stockage et l'emprunt favorisent la liquidité du marché de permis en augmentant la quantité de permis disponibles sur le marché⁶, et le volume de permis échangés (Godby et al. (2000)). Quatrièmement, les mécanismes de stockage et d'emprunt facilitent l'ajustement à des changements du plafond d'émissions par le régulateur, notamment s'il s'agit de cibles plus restrictives comme pour les Phases II et III de l'EU ETS.

Bosetti et al. (2008) valident empiriquement certaines de ces propriétés théoriques, en utilisant un modèle régional de l'économie mondiale⁷ avec changement tech-

³Cason et Gangadharan (2006) montrent que le stockage augmente le taux de non-conformité et les émissions totales dans des expérimentations avec un faible niveau de contrôle du régulateur. L'emprunt augmente le taux de conformité lors de la période présente, mais en déplaçant les excès d'émissions vers la période suivante.

⁴C'est à dire, la fonction de coût d'abattement ne change pas dans le temps, et l'information est complète sur la fonction de dommage marginal et les sources d'émissions (Rubin (1996), Schennach (2000)).

⁵Nous discutons en détails les effets de telles restrictions dans le cadre de l'EU ETS dans la Section 1.2.

⁶Notons que cet effet positif du stockage peut néanmoins être affecté par l'allocation initiale, et donner lieu à des cas de manipulation stratégique comme dans le cas de l'*Air Chaud* dans le cadre du Protocole de Kyoto.

⁷*World Induced Technical Change Hybrid Model* (WITCH), voir Bosetti et al. (2006) pour plus de détails.

nologique endogène⁸. Le stockage accroît non seulement l'efficacité économique, mais aussi l'efficacité environnementale de la politique de lutte contre le changement climatique dans le court terme. En effet, le stockage augmente le montant des émissions abattues durant les premières décennies, réduisant ainsi le risque d'impacts environnementaux irréversibles sur le climat. De plus, le stockage joue un rôle important dans l'accélération de l'adoption et la diffusion de technologies énergie efficaces et moins intensives en CO₂. Enfin, les auteurs concluent que des économies de coûts significatives sont possibles en terme de pertes de PIB évitées au niveau mondial, en autorisant une plus grande flexibilité inter-temporelle que sur les marchés de permis existants à l'échelle internationale.

Ces considérations théoriques sont également supportées par Ellerman et al. (2000) dans le contexte du Programme de lutte contre les pluies acides aux Etats-Unis : durant la Phase I (1995-1999), seulement 26.4 millions sur les 38.1 millions de permis distribués ont été utilisés pour couvrir les émissions, c'est à dire que les 11.65 millions restants de permis (30% du total de l'allocation) ont été stockés et utilisés graduellement durant la Phase II au-delà de 2000⁹. L'expérience américaine confirme l'hypothèse selon laquelle le stockage et l'emprunt sont considérés comme des éléments essentiels dans le succès de la mise en place d'un marché de permis. Ellerman et Montero (2007) analysent en détails l'efficacité du comportement de stockage. Le niveau économiquement optimal de stockage dépend *i*) du niveau des émissions de SO₂ en l'absence de marché de permis, *ii*) de la fonction de coût des réductions d'émissions de SO₂, et *iii*) du taux d'actualisation. En utilisant des intervalles raisonnables pour les valeurs du taux d'actualisation, et du taux contre-factuel de croissance des émissions de SO₂, les auteurs montrent que le comportement de stockage a été relativement efficace durant la Phase I et les premières années de la Phase II aux Etats-Unis.

Suivant ce bref descriptif des différents effets du stockage et de l'emprunt à prendre en compte lors de la création d'un marché de permis, nous détaillons dans la sous-section suivante leurs propriétés théoriques.

⁸Un autre résultat intéressant est que le stockage fournit des incitations en terme d'adoption précoce de technologies propres, ce qui induit des externalités positives inter-temporellement.

⁹Le plafond d'émissions devrait être atteint entre 2008 et 2010

1.1.2 Revue de littérature du stockage et de l'emprunt sur les marchés de permis en univers certain

Cette section présente les principaux résultats théoriques concernant l'utilisation du stockage et de l'emprunt de permis. De façon à isoler leurs effets spécifiques sur l'efficacité en terme de coûts et les dommages environnementaux, la littérature a suivi une modélisation du marché de permis en équilibre partiel, en négligeant l'interaction avec le marché du produit. Notre revue de littérature commence avec la contribution originale de Rubin (1996), qui a défini les propriétés d'un échange de permis inter-temporellement efficace, mais où il manque une restriction nécessaire sur l'utilisation de l'emprunt. C'est pourquoi nous nous référons explicitement par la suite à l'article de Kling et Rubin (1997). Nous exposons tout d'abord les hypothèses de ces modèles, puis nous distinguons plusieurs configurations de stockage et de l'emprunt, de façon à évaluer les avantages et les inconvénients respectifs de ces mécanismes de flexibilité inter-temporelle.

Le modèle de Rubin (1996) introduit des agents qui minimisent leur coût en incluant la contrainte environnementale dans leurs paramètres de décision. Comme Cronshaw et Kruse (1996) l'ont détaillé, et comme Bosetti et al. (2008) le rappellent, les modèles avec stockage et emprunt de permis développés dans cette revue de littérature reposent également sur les hypothèses suivantes : il existe un nombre constant de firmes maximisant leur profit et agissant en information parfaite sur un marché de permis compétitif, chaque firme reçoit une allocation égale de permis à chaque période, et les coûts marginaux d'abattement sont *constants* dans le temps.

La tâche du régulateur lors de la création du marché de permis consiste, parmi d'autres choix, à fixer le plafond d'émissions pour un ensemble de firmes hétérogènes polluantes. Le plafond d'émissions fixé par le régulateur se décompose en autant d'allocations individuelles de permis aux firmes. Nous supposons que les firmes assurent leur position de conformité avec la contrainte environnementale en échangeant des permis spatialement et inter-temporellement.

La banque de permis est strictement positive dans le cas du stockage, et strictement négative dans le cas de l'emprunt. Tout changement dans la banque de permis

est égal à la différence entre l'allocation de la firme et son niveau d'émissions à la date t .

Malgré les différences entre un permis et une ressource épuisable¹⁰, il est couramment supposé dans la littérature que les conditions de Hotelling pour les ressources épuisables s'appliquent sur un marché de permis. C'est pourquoi nous détaillons les conditions terminale et d'épuisement.

A la fin de la période d'engagement du marché de permis, la condition terminale implique que les émissions cumulées soient égales à la somme des objectifs de dépollution de chacun des agents présents sur le marché, et donc au plafond d'émissions global fixé par le régulateur¹¹. De plus, la condition d'épuisement implique que le nombre de permis stockés ou empruntés soit nul à la fin de la période d'engagement. Ces conditions assurent que les agents atteignent graduellement leur objectif de dépollution, de telle façon que le coût marginal de dépollution est égalisé en valeur présente sur la période de temps, et que la banque de permis est vide à la fin. Si à la fin de la période la banque de permis est strictement positive, les permis en surplus ont une valeur nulle et les agents gaspillent des permis. Inversement, si à la fin de la période la banque de permis est strictement négative, les agents doivent payer une pénalité.

Pour atteindre l'objectif de réductions d'émissions fixé par le régulateur, les firmes sont confrontées à des choix d'investissement dans des technologies plus propres. Le coût associé à ces investissements est appelé coût d'abattement, et est représenté par une fonction décroissante et convexe avec le niveau d'émissions¹².

¹⁰Liski et Montero (2005) relèvent les différences suivantes entre un permis et une ressource épuisable. Premièrement, sur un marché de permis avec stockage, le marché peut continuer à exister après l'épuisement du stock, tandis que pour une ressource épuisable le marché disparaît après la dernière extraction de la ressource. Deuxièmement, les coûts d'extraction et de stockage des permis sont nuls, tandis qu'ils sont généralement non-nuls pour une ressource épuisable. Troisièmement, la demande pour un permis supplémentaire provient de la demande des mêmes firmes présentes sur le marché de permis (et qui possèdent aussi des permis), tandis que la demande pour une unité supplémentaire d'une ressource épuisable provient le plus souvent d'une demande d'un acteur extérieur au marché, tel que le consommateur.

¹¹Voir aussi Leiby et Rubin (2001).

¹²Cette fonction a été énoncée originellement par Montgomery (1972). Leiby et Rubin (2001)

Le coût marginal d'abattement (CMA) d'une firme est associé avec une réduction d'une unité de son niveau d'émissions à la date t . A l'équilibre d'un marché de permis dans un cadre statique¹³, les agents preneurs de prix ajustent leurs émissions jusqu'à ce que le coût marginal d'abattement soit égal au prix du permis à la date t .

Etudions à présent trois configurations des mécanismes de flexibilité inter-temporelle : "stockage de permis uniquement", "stockage et emprunt de permis", "stockage et emprunt restreint de permis".

Cas avec stockage de permis uniquement

Dans cette configuration, les agents peuvent réduire leurs émissions directement, échanger et stocker des permis de façon à être en conformité avec la contrainte environnementale. Si, par exemple, une firme décide de polluer moins que le plafond d'émissions, elle peut vendre ses permis en surplus aux autres firmes, les stocker pour un usage futur ou pour les vendre ultérieurement.

Chaque firme ajuste son niveau d'émissions en fonction de sa production, et gère son stock de permis. La firme minimise ses coûts d'abattement en valeur actualisée, en choisissant le niveau optimal d'émissions et le volume de permis échangés¹⁴.

Les résultats obtenus dans le cas "stockage uniquement" appellent les commentaires suivants : si la firme a une position de stockage net à la fin de la période, alors les permis en surplus ont une valeur nulle. La firme égalise son CMA avec le prix des permis à l'équilibre. Cette première analyse suggère d'autoriser le stockage de permis de façon à compléter le mécanisme d'échange spatial de permis par celui de flexibilité inter-temporelle, et ainsi à atteindre les objectifs d'abattement à moindre coût. Dans la sous-section suivante, nous autorisons l'emprunt de permis,

incluent des conditions sur l'output, où la fonction de coût d'abattement est fortement convexe. Godby (2000) détaille les propriétés de fonctions de coût d'abattement non convexes.

¹³Voir Hahn (1980).

¹⁴Voir Rubin (1996) concernant la résolution formelle du programme d'optimisation, ainsi que le détail du programme du régulateur, des conditions d'existence d'un équilibre, et de l'optimum social.

de façon à envisager les effets d'une complète flexibilité inter-temporelle.

Cas avec stockage et emprunt de permis

Dans ce cas de figure, les firmes peuvent échanger, stocker et emprunter des permis sans restriction. L'emprunt consiste pour la firme à polluer plus qu'elle n'est autorisée à le faire durant la période présente, mais à la condition que le déficit cumulé soit résorbé d'ici la fin de la période. L'autorisation de l'emprunt de permis consiste à lever la contrainte de non-négativité sur la banque de permis.

Le cas avec emprunt et stockage de permis nous permet de compléter notre analyse précédente : si la firme est en position d'emprunt net à la fin de la période, alors elle doit payer une pénalité pour assurer sa conformité avec le plafond d'émissions. La firme égalise son CMA avec le prix du permis. L'autorisation complète du stockage et de l'emprunt de permis permet à la firme de mieux ajuster son flux d'émissions dans le temps, et d'économiser ainsi des coûts de mise en conformité. Enfin, examinons le cas de figure où l'emprunt de permis est restreint.

Cas avec stockage et emprunt restreint de permis

A cause de l'actualisation des coûts d'abattement futurs, il peut être utile pour le régulateur de pénaliser l'emprunt de permis en appliquant un taux d'échange inter-temporel, de telle façon que si les firmes empruntent beaucoup de permis en période initiale, elles rembourseront plus de permis qu'elles n'en ont effectivement utilisés lors de la période suivante. En appliquant un taux d'intérêt sur la banque de permis, le régulateur peut changer le profil temporel des émissions et la quantité cumulée de permis pour atteindre l'objectif de dépollution.

Introduisons la notation suivante concernant le taux d'intérêt sur la banque de permis : $\delta^t = e^{-\rho t}$. La firme est incitée à échanger des permis en fonction du taux d'intérêt δ^t . Le cas avec stockage et emprunt restreint de permis appelle les commentaires suivants (Kling et Rubin (1997)) :

- le fait de fixer $\delta^t < 1$ fournit une incitation efficace au stockage, tandis que les firmes doivent rembourser *plus* de permis en seconde période qu'elles n'en ont empruntées en période initiale ;

- le poids de la dette est plus important dans un système modifié de stockage et emprunt de permis que dans un système non-modifié ;
- un système modifié de stockage et d'emprunt de permis permet d'atteindre l'objectif de dépollution d'une façon plus satisfaisante socialement, comme nous le détaillons ci-après.

Sous l'hypothèse que le stockage et l'emprunt de permis sont autorisés, et que le régulateur a choisi un taux d'intérêt sur la banque de permis strictement *positif*, l'introduction d'un taux d'échange inter-temporel a les conséquences suivantes :

- concernant l'emprunt de permis, pour chaque tonne de CO₂ non-abattue, le gain de la firme à partir du taux d'intérêt privé est réduit du montant du taux d'échange inter-temporel ;
- l'effet principal d'un taux d'échange inter-temporel consiste à changer le profil temporel des émissions, et non les quantités émises. Le changement opère marginalement sur les dommages stockés dans le temps, avec plus de stockage et moins d'emprunt que dans un système non-modifié. L'effet est mineur sur les quantités échangées inter-temporellement.

Kling et Rubin (1997) suggèrent l'introduction d'un taux d'intérêt égal au taux d'intérêt moyen utilisé dans l'industrie pour financer les dépenses de capital à moyen terme. Pour le CO₂, Leiby et Rubin (2001) identifient le taux inter-temporel de substitution optimal comme étant le ratio des dommages marginaux stockés en période présente par rapport à la valeur future actualisée des dommages marginaux stockés, moins le taux d'absorption des émissions dans l'atmosphère, augmenté de la différence entre le taux d'actualisation de la firme et celui du régulateur¹⁵. De plus, nous pouvons citer plusieurs de ces taux utilisés sur des marchés de permis existants : le contrôle progressif des émissions de flux dans le cadre du programme NO_x dans le Nord-Est des Etats-Unis, et des ratios distincts dans le programme *Clean Air Interstate Rule* aux Etats-Unis (2 :1 à partir de 2010, 3 :1 à partir de 2015).

¹⁵Ce résultat est obtenu avec une modélisation différente distinguant entre les *flux* d'émissions et le *stock* accumulé de polluants. Les émissions de CO₂ sont caractérisées par des dommages de stocks qui perdurent après la fin du programme de régulation environnementale.

Nous avons détaillé dans cette sous-section les avantages liés à l'introduction d'un système avec emprunt restreint de permis. Dans ce qui suit, nous discutons plusieurs questions soulevées par l'autorisation des mécanismes de stockage et d'emprunt de permis sans restrictions.

Lien avec la règle de Hotelling

Rubin (1996), en univers certain, et Schennach (2000), en univers incertain, ont étudié les effets du stockage sur le profil temporel du prix du permis. Cette analyse fait référence à la règle de Hotelling (1931), selon laquelle le prix réel d'une ressource épuisable croît dans le temps à un pourcentage égal au taux d'actualisation. Le résultat de Hotelling montre que, pour obtenir une exploitation efficiente d'une ressource épuisable, le changement en pourcentage du prix net par unité de temps doit être égal au taux d'actualisation, de façon à maximiser la valeur présente du capital de la ressource tout au long de sa période d'extraction.

En prenant en compte les effets du stockage et de l'emprunt de permis sur le profil temporel du prix du permis, Kling et Rubin (1997) montrent que :

- si l'emprunt de permis est autorisé, le prix du permis suit une règle de Hotelling ;
- si l'emprunt de permis est interdit, le prix du permis croît à un taux *inférieur* au taux d'intérêt.

La règle de Hotelling sert d'indicateur de rareté pour les ressources épuisables en concurrence parfaite, mais manque de validation empirique comme nous le détaillons dans la deuxième section de ce Chapitre. Examinons enfin les conséquences des mécanismes de stockage et d'emprunt de permis sur la distribution des volumes d'émissions dans le temps.

Distribution des volumes d'émission dans le temps

Nous nous intéressons à la façon dont la firme ajuste son volume d'émission lorsqu'elle profite de la possibilité de pratiquer le stockage et l'emprunt de permis. Ces développements sont communs aux modèles de Rubin (1996) et Kling et Rubin (1997), et appellent les commentaires suivants :

- quand les firmes désirent pratiquer l'emprunt de permis et qu'il est autorisé, le volume d'émission *décline* dans le temps ;
- quand les firmes désirent pratiquer l'emprunt de permis et qu'il est interdit, le volume d'émission *pourrait augmenter* dans le cas précis où les standards d'émission deviendraient moins contraignants dans le futur. Autrement, le flux d'émissions restera constant, et le multiplicateur associé à la contrainte de non-négativité peut être interprété comme un paiement périodique que la firme consent à payer pour une rente perpétuelle, dont le prix est égal au prix actualisé d'un permis.

La question centrale réside dans le choix du taux d'actualisation des firmes : des valeurs plus ou moins élevées impliquent, respectivement, plus ou moins d'emprunt de permis, tandis qu'un taux d'actualisation nul conduit au même niveau de pollution à chaque période. Dans le cas particulier où le prix des permis est décroissant dans le temps, la firme est incitée à retarder les dépenses d'abattement en empruntant des permis lors des périodes initiales, et en les remboursant lors des périodes suivantes avec des permis achetés moins coûteux *ceteris paribus*. Cette analyse révèle de potentielles conséquences *negatives* de l'autorisation de l'emprunt de permis non-restreint, lorsque les périodes initiales sont caractérisées par une concentration des émissions, et par une pollution globale plus importante que dans une situation où l'emprunt de permis ne serait pas autorisé. Concernant le stockage de permis, les firmes investissent dans des équipements d'abattement, et stockent des permis, lorsqu'elles anticipent une augmentation des coûts d'abattement à un taux supérieur au taux d'actualisation, sinon elles ne supporteraient pas de coûts d'abattement supplémentaires en période présente. Si la fonction de dommage provenant des émissions est convexe, et que les standards sont plus contraignants dans le futur¹⁶, le fait d'autoriser le stockage permet de *réduire* les dommages sociaux¹⁷. Il s'agit d'un effet *positif* du stockage de permis : en donnant

¹⁶En effet, quand le plafond d'émissions reste constant ou se relâche, l'autorisation de l'emprunt de permis entraîne une augmentation des dommages sociaux, et une diminution des coûts des firmes.

¹⁷Cette conclusion dépend naturellement du taux d'actualisation. S'il est nul, la firme a une incitation à stocker des permis lors des périodes initiales pour une utilisation ultérieure. S'il est

aux firmes les incitations d'aller au-delà des plafonds de pollution actuels, les firmes allouent leurs émissions inter-temporellement de façon à atteindre des dommages sociaux plus faibles¹⁸. Nous soulignons ici une propriété importante du stockage de permis, à savoir qu'il permet à la firme de *lisser* ses flux d'émissions dans le temps. Lorsque les dommages sociaux sont une fonction croissante du niveau de pollution émis à la période t , une politique environnementale appropriée consiste donc à autoriser le stockage de permis, et à durcir les plafonds de pollution.

Nous avons détaillé dans cette revue de littérature¹⁹ dans quelle mesure l'échange inter-temporel de permis altère le *profil temporel* et l'*amplitude* des dommages. La décision d'autoriser ou non l'emprunt de permis dépend d'un arbitrage entre les coûts supportés par la firme en terme d'efficacité, et une pression plus grande sur l'environnement. La firme a une incitation à pratiquer l'emprunt de permis si la contrainte environnementale est constante, ou ne devient pas plus restrictive dans le temps. Comme indiqué précédemment, il apparaît dans ce cas approprié d'introduire un taux d'intérêt spécifique aux permis empruntés, de façon à ce que la distribution des émissions dans le temps ne conduise pas à une concentration lors de la période initiale²⁰.

Notons enfin que d'autres impacts potentiels de l'autorisation du stockage et de l'emprunt de permis existent, telle que la possibilité de manipulation stratégique du marché de permis par exemple, qui a fait l'objet de nombreux développements dans la littérature concernant l'*Air Chaud* en Russie dans le contexte du Protocole de Kyoto²¹, et que nous ne développons pas ici.

élevé, la firme n'a pas intérêt à stocker des permis.

¹⁸Notons que les dommages totaux sont réduits si le flux d'émissions est plus constant à travers le temps.

¹⁹Pour une discussion plus exhaustive des modèles de stockage et d'emprunt de permis existants, voir Newell et al. (2005).

²⁰Notons que parmi les deux sources d'inefficacité qui peuvent affecter l'optimum social, à savoir le taux d'actualisation utilisé par la firme et le fait que les dommages totaux dépendent de la distribution des flux d'émissions dans le temps, un système avec stockage et emprunt restreint de permis permet de corriger la première source d'inefficacité, mais pas nécessairement la seconde.

²¹L'allocation de permis aux pays de l'ex-Union Soviétique basée sur les niveaux d'émission de 1990 apparaît généreuse comparée à leurs besoins réels d'émissions sur la période 2008-2012, suite

Dans cette première section, le stockage et l'emprunt de permis ont été introduits en tant qu'outil de flexibilité inter-temporelle permettant de minimiser les coûts totaux d'abattement de pollution. L'autorisation de pratiquer le stockage et l'emprunt ne doit pas être comprise ici comme diminuant l'efficacité du marché de permis, mais bien comme un outil mis en place par le régulateur à disposition des agents dans le but de lisser leurs émissions. Dans la deuxième partie du Chapitre 1, nous examinons plus spécifiquement les conséquences des règles relatives au stockage et à l'emprunt de quotas adoptées dans l'EU ETS.

1.2 Les effets de la restriction du stockage inter-périodes sur le prix européen du carbone : évidence empirique de la Phase I (2005-2007)

Sur l'EU ETS, créé en 2005 dans le but d'aider les Etats-Membres à atteindre leur objectif du Protocole de Kyoto de réduire de 8% leurs émissions de CO_2 par rapport aux émissions de 1990, les installations couvertes ne sont autorisées à stocker et emprunter des quotas que durant 2005-2007 et durant 2008-2012. Nous avons vu dans la Section 1.1 que, quand le stockage et l'emprunt de permis sont autorisés sans restrictions, le marché de quotas bénéficie d'une complète flexibilité inter-temporelle (Rubin (1996), Schennach (2000)). En présence de ces mécanismes, nous avons détaillé qu'un marché de quotas est efficient inter-temporellement, et que le prix du permis reflète les coûts d'opportunité conduisant à un choix efficient de mesures d'abattement (Schleich (2006)). A notre connaissance, aucune analyse empirique n'a détaillé les effets d'une flexibilité inter-temporelle complète intra-période, et d'une restriction sur le transfert de quotas inter-périodes sur les changements de prix du CO_2 dans le cadre de l'EU ETS.

à une période de récession. Avec un fort potentiel d'amélioration de son efficacité énergétique, la Russie constitue le meilleur exemple du risque de manipulation du marché de permis, par l'intermédiaire de décisions stratégiques concernant la gestion de son surplus de permis (Baron (1999), Burniaux (1999), Bernard et al. (2003), Bohringer et Loshel (2003), Holtmark (2003), Korppoo et al. (2006)).

Dans un cadre expérimental, Ehrhart et al. (2005) ont montré que la restriction du transfert de quotas inter-périodes conduit à des ajustements inefficients, avec durant 2005-2007 un sous-investissement dans les technologies d'abattement et un prix bas du CO_2 , et durant 2008-2012 un plafond d'émissions plus restrictif, un pic de prix du CO_2 et un sur-investissement dans les réductions d'émissions.

Parmi les principales explications des prix bas du CO_2 rencontrés vers la fin de la Phase I, la littérature existante identifie des présomptions de sur-allocation, des efforts d'abattement précoces en 2005 dûs à des prix élevés du CO_2 , et probablement des coûts d'abattement décroissants en 2006 dûs à des événements climatiques extrêmes et une bascule de la production d'électricité du charbon vers le gaz naturel dans un contexte de prix décroissants du gaz naturel comparé au charbon (Ellerman et Buchner (2008), Mansanet-Bataller et al. (2007), Alberola et al. (2008)). Une analyse détaillée des effets des mécanismes de stockage et d'emprunt de quotas semble donc manquante. Il apparaît nécessaire de décomposer ces effets sur les prix du CO_2 qui se développent différemment selon deux cas. Si le transfert de quotas inter-périodes est autorisé, nous pouvons anticiper que les changements de prix du CO_2 suivront la règle de Hotelling, croissant au même taux que le taux d'intérêt. Si le transfert de quotas inter-périodes est restreint, nous pouvons anticiper des niveaux de prix du CO_2 *plus faibles* en Phase I, et *plus élevés* en Phase II. Le premier effet est dû à la validité plus courte des quotas que l'horizon d'investissement des firmes. Le second effet est dû à une plus grande rareté des quotas, comparativement à une situation de flexibilité inter-temporelle complète.

Entre 2005 et 2007, les installations couvertes par l'EU ETS sont autorisées à utiliser le stockage et l'emprunt de quotas sans restrictions. Les quotas sont délivrés de façon annuelle sur les comptes des industriels, et sont valides pour couvrir les émissions durant chaque période de conformité. L'allocation intervient à la fin du mois de février, soit deux mois avant la restitution des quotas concernant la précédente période de conformité en avril. Dans ce cadre de transfert de quotas intra-période, nous testons si le développement du prix du CO_2 est compatible avec les conditions d'équilibre du marché inter-temporel de quotas. Le modèle théorique

de Schennach (2000), appliqué par Helfand (2006) au marché américain du SO_2 , guide notre analyse à la Hotelling.

Entre 2007 et 2008, les opérateurs de marché ne sont pas autorisés à utiliser les mécanismes de stockage et d'emprunt de quotas. Afin d'identifier l'impact des restrictions de transfert de quotas inter-périodes sur les changements de prix quotidiens du CO_2 , nous étudions la relation entre les prix spots du CO_2 et les contrats futures de maturité Décembre 2006, 2007 et 2008. Nous cherchons à évaluer si les contrats futures permettent de prévoir systématiquement les prix spots du CO_2 , d'après la structure par terme des prix futures mise en évidence par Fama et French (1987). De plus, l'impact de la restriction tardive du transfert de quotas inter-périodes est évalué à travers des variables dummy représentant les communications officielles entre la France, la Pologne et la Commission Européenne.

Par rapport à la littérature sur l'efficacité des mécanismes de stockage et d'emprunt sur le marché américain du SO_2 (Helfand et al. (2006)), nos résultats peuvent se résumer en deux points. Concernant les mécanismes de stockage et d'emprunt de quotas *intra*-période, nous montrons que la règle de Hotelling n'est pas vérifiée durant 2005-2007, ce qui confirme que durant la Phase I l'allocation n'a pas rempli son objectif d'instaurer une perception de rareté de quotas échangés chez les opérateurs de marché. Concernant les mécanismes de stockage et d'emprunt de quotas *inter*-périodes, nous observons un divorce entre la série de prix spot du CO_2 , qui décroît de façon constante vers zéro, et le prix du contrat futures de maturité Décembre 2008, qui se stabilise aux alentours de 20 €. Notre analyse statistique révèle que la relation *cost-of-carry* entre les prix spot du CO_2 et les futures de maturité durant la Phase II n'est plus respectée à partir d'octobre 2006, et ce jusqu'à la fin de la Phase I. Ce résultat suggère que la restriction sur le transfert de quotas entre les Phases I et II empêche d'atteindre un signal-prix efficient dans l'EU ETS. De plus, les soumissions des PNAQs II par la France et la Pologne, et la décision finale par la Commission Européenne, confirment cet effet statistiquement significatif de la restriction du transfert de quotas inter-périodes sur le bas niveau de prix du CO_2 observé jusqu'à la fin de la Phase I. Ces résultats sont robustes à l'introduction de chocs sur les marchés de l'énergie et aux événements climatiques

extrêmes identifiés comme déterminants du prix du CO_2 dans la littérature, et que nous détaillons dans le Chapitre 2.

La suite de la deuxième section du Chapitre 1 est organisée comme suit. La Section 1.2.1. détaille les principales raisons qui ont conduit les Etats-Membres à restreindre le transfert de quotas entre 2007 et 2008 dans l'EU ETS, et le développement du prix du quota durant 2005-2007. La Section 1.2.2. introduit notre analyse à la Hotelling. La Section 1.2.3. présente notre base de données. La Section 1.2.4. contient les résultats d'estimations, ainsi qu'une discussion.

1.2.1 Les règles de fonctionnement du stockage et de l'emprunt de quotas adoptées dans l'EU ETS

Dans cette sous-section, nous expliquons tout d'abord les motifs qui ont conduit les Etats-Membres à bannir le transfert de quotas entre 2007 et 2008. Puis, nous examinons le développement du prix du quota durant 2005-2007, avec le changement structurel caractéristique de la série temporelle au mois d'avril 2006.

Principales raisons de la restriction du transfert de quotas entre 2007 et 2008

D'après la Directive 2003/87/EC²², la Commission Européenne a laissé aux Etats-Membres la décision d'autoriser ou non le transfert des quotas stockés ou empruntés de la Phase I vers la Phase II. Néanmoins, la méthode d'évaluation de la Commission concernant les PNAQs II a conduit à bannir en pratique le transfert de quotas inter-périodes, en exigeant que chaque quota stocké soit déduit de l'allocation de Phase II²³.

²²La Directive 2003/87/EC est disponible à l'adresse suivante : <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32003L0087:EN:NOT>

²³La Commission Européenne a en effet déclaré : "Pour chaque quota autorisé à être stocké, un quota doit être déduit de la quantité totale de quotas émis pour la seconde période. De plus, le stockage de quotas doit être examiné sous l'angle des subventions des Etats-Membres dans le cadre européen. Si le stockage de quotas n'est pas le résultat de réductions effectives d'émissions, il existe une forte probabilité que ces quotas stockés seront déclarés incompatibles avec les règles de concurrence au sein de l'Union Européenne concernant les subventions par les Etats-Membres."

Les discussions concernant les mécanismes de stockage et d'emprunt de quotas ont donc été caractérisées par de soudains changements de décisions. Lors de la création de l'EU ETS en 2005, tous les Etats-Membres ont décidé, à l'exception de la France et la Pologne, contre le transfert de quotas inter-périodes. Tous les quotas non restitués d'ici fin 2007 sont annulés et non transférables vers la période suivante de conformité de 5 ans. Au cours de de l'élaboration des PNAQs II, la France et la Pologne ont à leur tour banni le transfert de quotas vers la Phase II.

Deux raisons principales peuvent expliquer cette restriction du transfert de quotas inter-périodes par les Etats-Membres vis-à-vis de leur objectif de réduction d'émissions dans le Protocole de Kyoto (Ehrhart et al. (2005), Schleich (2006)). Premièrement, le transfert de quotas stockés entre 2007 et 2008 peut affaiblir la capacité des Etats-Membres à atteindre leur objectif différencié de réduction d'émissions au sein de l'Union Européenne commençant en 2008 (voir le Tableau 1). De plus, le fait de stocker un grand nombre de quotas peut déclencher la règle de réserve d'engagement, prévue par le Protocole de Kyoto, qui impose aux Etats de l'Annexe B de conserver sur leur compte au moins 90% de leur allocation.

En effet, il était difficile en 2006 pour les Etats-Membres de prévoir le montant de quotas stockés au moment de la préparation des PNAQs II. En présence d'un montant non-anticipé de quotas stockés, les secteurs couverts par l'EU ETS auraient dû effectuer des efforts d'abattement supplémentaires pour respecter les engagements pris au niveau national dans le cadre du Protocole de Kyoto²⁴.

C'est pourquoi les Etats-Membres ont décidé de prohiber le transfert des quotas non-utilisés en Phase I (2005-2007) vers la période de conformité du Protocole de Kyoto (2008-2012). Les installations couvertes par l'EU ETS ne peuvent donc pas utiliser des quotas stockés durant la Phase I pour assurer leur conformité en Phase II (2008-2012). Avant 2008, seuls les certificats de réductions d'émissions délivrés dans le cadre du Mécanisme de Développement Propre (MDP) auraient pu agir sous forme limitée de transfert de quotas inter-périodes, si la connexion entre les

IP/06/1650, Bruxelles, 29 novembre, 2006.

²⁴Sous l'hypothèse que les Etats-Membres mettent en place des politiques spécifiques aux secteurs non-couverts par l'EU ETS. Or, nous n'observons pas au niveau européen de telles politiques, sauf au Royaume-Uni.

registres européen et international avait été effective avant la fin de la Phase I²⁵. Aucune installation ne peut par ailleurs utiliser des quotas empruntés entre les Phases I et II.

Au mois de janvier 2008, la révision de la Directive de l'EU ETS a énoncé très clairement qu'aucun changement n'est à prévoir concernant les mécanismes actuelles de stockage et d'emprunt de quotas : *"la Directive prévoit un transfert sans restriction des quotas stockés de la Phase II vers la Phase III. Cela signifie que chaque quota non restitué ou retiré durant la seconde période de conformité pourra être utilisé en valeur nominale durant la Phase III."*²⁶.

Examinons dans la sous-section suivante le développement du prix du quota correspondant à cette situation spécifique de restrictions sur le transfert de quotas inter-périodes durant la Phase I.

Développement du prix du quota durant 2005-2007

La Figure 1.1 montre l'évolution du prix spot du CO_2 , et des contrats futures de maturité décembre 2007 et décembre 2008, sur la période allant du 1er juillet 2005 au 17 décembre 2007²⁷.

Commençant à 8€ le 1er janvier 2005, le prix du CO_2 a ensuite fluctué aux alentours de 25-30€ jusqu'à l'annonce des émissions vérifiées de l'année de confor-

²⁵Durant la Phase II de l'EU ETS (2008-2012), les installations européennes peuvent utiliser des crédits provenant des projets MDP ou de Mise en Oeuvre Conjointe (MOC) pour assurer leur position de conformité, dans une proportion limitée spécifiée dans chaque PNAQ. Les installations peuvent importer des crédits provenant des mécanismes de projet du Protocole de Kyoto dans l'EU ETS à hauteur de 13.4% en moyenne. La délivrance de ces crédits sur les comptes des industriels en Europe est possible à partir du moment où les registres international et européen seront connectés. En pratique, le lien entre les transactions européennes et internationales, respectivement le *Community Transaction Log* et l'*International Transaction Log*, était attendu avant la fin de l'année 2007. Cette connexion permet la délivrance de crédits MDP sur le registre européen. Cependant, à cause de délais institutionnels et techniques, la Commission Européenne a fixé comme date limite de connexion entre les deux registres au mois d'avril 2009.

²⁶MEMO/08/35 Bruxelles, 23 janvier 2008.

²⁷C'est à dire, de la date d'ouverture de la place de marché Bluenext à celle de livraison du contrat futures de maturité décembre 2007.

mité 2005. Le 24 avril 2006, la série temporelle du prix du CO_2 est caractérisée par un changement structurel dû à l'annonce de vérifications d'émissions par certains Etats-Membres. Les émissions vérifiées sont 4% *plus faibles* que l'allocation durant l'année de conformité 2005 (Ellerman et Buchner (2008)). Depuis le rapport officiel des émissions vérifiées par la Commission Européenne²⁸, le marché de quotas est caractérisé par deux signaux de prix correspondant à des dynamiques différentes. Suite à l'évènement de conformité 2005 révélant la sur-allocation de quotas, et aux déclarations de la Commission Européenne d'octobre 2006 annonçant des plafonds d'émissions plus restrictifs en Phase II, le prix spot du CO_2 et le contrat futures de maturité décembre 2007 ont décliné vers zéro, tandis que le prix du contrat futures de maturité décembre 2008 est caractérisé par une structure de prix strictement *croissants* aux alentours de 25€ fin 2007. Le divorce entre la série de prix spot et le contrat futures de maturité décembre 2007 d'une part, et le prix du contrat futures de maturité décembre 2008 d'autre part, en d'autres termes la déconnexion entre les prix de Phase I (2005-2007) et ceux de Phase II (2008-2012), s'explique largement par la fin de la validité des quotas *après* l'évènement de conformité 2007 intervenant au mois d'avril 2008, et par l'impossibilité de transférer des quotas non-utilisés vers la période suivante de conformité.

Comme nous le voyons dans la Figure 1.1, l'échantillon est divisé en deux sous-périodes à cause de la présence du changement structurel dans la série de prix du CO_2 suivant les annonces simultanées des émissions vérifiées pour l'année de conformité 2005 par la région wallonne en Belgique, la France et l'Espagne, qui ont servi de révélateur à l'ajustement des anticipations des agents. En utilisant la méthode développée par Lee et Strazicich (2001, 2003)²⁹, qui révèle la présence de changements endogènes de structure dans la moyenne de la série temporelle tout en testant l'existence d'une racine unitaire, nous identifions la date du 20 avril 2006 comme étant un point de rupture dans notre échantillon. Nous excluons ces

²⁸Voir le communiqué de presse IP/06/612 du 15 mai 2006, disponible à l'adresse suivante : <http://www.europa.eu>.

²⁹En utilisant cette méthode, les données elles-mêmes suggèrent le moment de changement structurel dans la série temporelle. Leurs codes GAUSS peuvent être trouvés à l'adresse suivante : <http://www.cba.ua.edu/jlee/gauss/>.

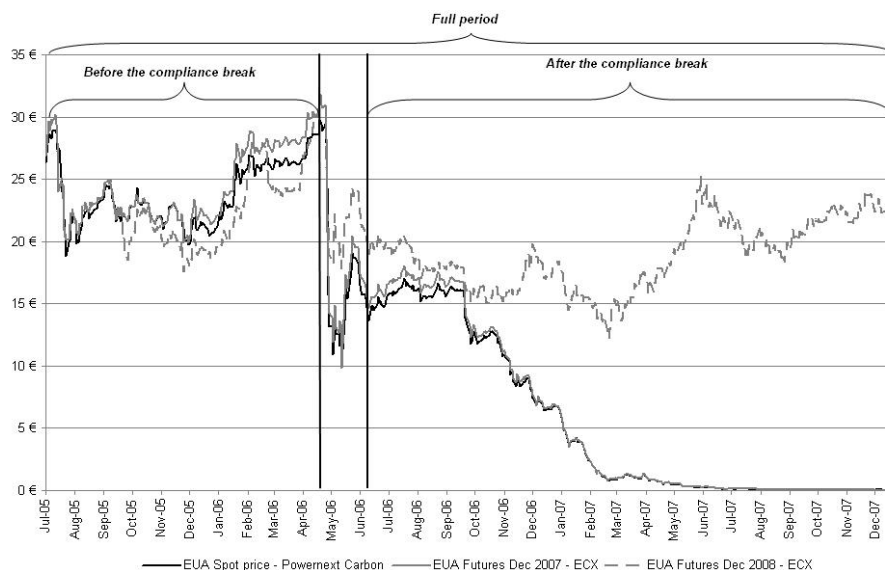


FIG. 1.1 – Prix spot et futures du CO_2 du 1er juillet 2005 au 17 décembre 2007 d’après BlueNext et ECX

changements de prix extrêmes de nos régressions, sauf pour l’échantillon complet³⁰. Les deux sous-périodes que nous considérons sont la période ”avant l’évènement de conformité” allant du 1er juillet 2005 au 20 avril 2006, et la période ”après l’évènement de conformité” allant du 22 juin 2006 au 17 décembre 2007. Ce changement de structure peut être associé aux caractéristiques institutionnelles de l’EU ETS durant la Phase I. Avec 54% de l’ajustement du prix spot du CO_2 intervenant sous 4 jours³¹, à partir du 24 avril 2006 ce choc élimine toute information incertaine concernant les positions nettes courtes/longues des installations³².

Comme expliqué précédemment, les principales explications des prix bas de la série spot du CO_2 déclinant vers zéro à la fin de la Phase I incluent des

³⁰Car la série temporelle conserve une racine unitaire en différence première logarithmique, même en présence d’un changement structurel.

³¹Voir Ellerman et Buchner (2008).

³²Une installation est définie comme étant nette courte (longue) quand elle enregistre un déficit (surplus) de quotas alloués par rapport à son niveau effectif d’émissions. Une installation nette courte (longue) achète (vend) des quotas dans le but de couvrir ses émissions et d’assurer sa position de conformité. Nous détaillons cette logique dans le Chapitre 2.

présomptions de sur-allocation, et l'influence de variables climatiques et des prix des énergies (Ellerman et Buchner (2008), Mansanet-Bataller et al. (2007), Alberola et al. (2008)). En plus de ces explications, le modèle estimé dans la sous-section suivante évalue le rôle spécifique joué par la restriction du transfert de quotas inter-périodes, qui pourrait contribuer à une meilleure explication des prix bas du prix spot du CO_2 observé à la fin de la Phase I.

1.2.2 Analyse

Dans cette sous-section, nous expliquons tout d'abord le cadre théorique sous-jacent à notre stratégie d'estimation. Puis, nous présentons notre spécification économétrique.

Modélisation économique

Dans le but de caractériser l'équilibre inter-temporel du marché de quotas durant 2005-2007, le modèle que nous estimons est basé sur deux courants de littérature développés par Schennach (2000) et Slade et Thille (1997), qui ont été appliqués par Helfand et al. (2006) au marché américain du SO_2 .

Premièrement, Schennach (2000) étudie le comportement de stockage de quotas par les industries concernées par le Programme de lutte contre les pluies acides aux Etats-Unis, et implicitement le comportement du prix spot, dans un modèle stochastique à horizon de temps infini concernant l'allocation, l'utilisation et le stockage de quotas. En cadre certain, ce modèle prédit que le prix du CO_2 doit croître au même taux que le taux d'intérêt, conformément à la règle de Hotelling. En cadre incertain, le programme d'optimisation d'agents neutres au risque s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{e_t} \left\{ E_0 \left[\int_0^{\infty} e^{-\mu t} c_t (\epsilon_t - e_t) dt \right] \right\} \\ \dot{S}_t = Y_t - e_t \\ S_t \geq 0 \end{array} \right.$$

avec $E(t)$ la fonction d'espérance d'utilité à la Von Neumann-Morgenstern, e_t le niveau d'émissions après abattement, ϵ_t le niveau contre-factuel d'émissions,

$a_t = \epsilon_t - e_t$ le montant total d'abattement effectué par l'ensemble des firmes à la date t , $c_t(a_t)$ le coût total minimum subi par l'ensemble des firmes pour abattre a_t , Y_t le montant total de quotas distribués aux agents, S_t le nombre de quotas en banque à la date t , r le taux d'intérêt sans risque, ρ la prime de risque spécifique au fait de détenir un quota parmi un portefeuille diversifié d'investissements, et $\mu = r + \rho$ le taux spécifique aux actifs risqués dans l'esprit du Modèle d'Evaluation des Actifs Financiers (MEDAF).

La solution de ce problème est une version en temps continu du modèle de Pindyck (1993) de détermination rationnelle du prix des matières premières :

$$E_t[p_{t+1}] = (1 + \mu)p_t - \psi_t \quad (1.1)$$

avec ψ_t le *convenience yield*³³. L'eq. (1.1) représente la relation de base que nous souhaitons tester.

Deuxièmement, sous l'hypothèse qu'un quota puisse être considéré comme une ressource épuisable³⁴, le modèle de Slade et Thille (1997) fournit un cadre théorique analogue en maximisant la fonction $V(R, p, \phi)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{q\tau} E_t \left\{ \int_t^\infty e^{-\rho(\tau-t)} \pi_\tau d\tau \right\} \\ \dot{R}_\tau = -q\tau \\ R_\tau \geq 0, q\tau \geq 0 \\ \frac{\partial \phi}{\phi} = \mu_\phi dt + \sigma_\phi dz_\phi \\ \frac{\partial p}{p} = \mu_{pt} dt + \rho_p dz_p \end{array} \right.$$

avec $\pi_\tau = [p_\tau q_\tau - C(q_\tau, R_\tau, \phi_\tau)]$ le profit ajusté pour le risque au taux d'actualisation ρ , ϕ un choc de productivité aléatoire, \dot{R} l'état de la banque R en fonction du taux d'extraction q . Les deux dernières contraintes représentent un ensemble de processus de Ito avec drift pour modéliser l'incertitude.

³³D'après Ellerman et al. (2000), un agent peut conserver un stock de quotas de façon à se prémunir contre des changements non-anticipés de ses émissions, que l'on appelle *convenience yield*.

³⁴Voir la discussion développée dans la Section 1.1.

A l'équilibre, l'évolution du prix du quota P_t est :

$$\frac{\frac{1}{\partial t} E_t \partial P_t}{P_t} = r + \beta(r^m - r) \equiv \rho \quad (1.2)$$

avec E_t l'utilité espérée, r le taux d'intérêt sans risque, r^m le taux de rendement d'un investissement dans un portefeuille diversifié, et β le risque spécifique à cet actif. ρ représente le taux d'actualisation ajusté pour le risque utilisé par les firmes pour choisir le chemin d'émissions minimisant les coûts d'abattement.

Nous remarquons donc qu'à l'équilibre l'évolution du prix du quota p_t suit une relation, appelée "Hotelling-MEDAF" par Slade et Thille (1997), entre le taux d'intérêt sans risque, le taux de rendement d'un investissement dans un portefeuille diversifié, et la prime de risque spécifique à cet actif similaire à l'eq.(1.1).

Dans la sous-section suivante, nous détaillons comment utiliser ce cadre théorique dans notre stratégie d'estimation.

Spécification économétrique

Notons ici r_t^f comme étant le taux d'intérêt sans risque. Comme développé dans Helfand et al. (2006), nous réarrangeons l'eq.(1.1) pour isoler les prix en différence première sur le côté gauche de l'équation :

$$E_t p_{t+1} - p_t = r_t^f p_t + \rho_t p_t - \psi_t \quad (1.3)$$

En ré-écrivant $\rho_t = \frac{\sigma_{am}}{\sigma_{mm}}(r_t^m - r_t^f)$, ce qui est une pratique courante dans le MEDAF, nous obtenons :

$$E_t p_{t+1} - p_t = r_t^f p_t + \frac{\sigma_{am}}{\sigma_{mm}}(r_t^m - r_t^f) p_t - \psi_t \quad (1.4)$$

avec r_t^m le taux de rendement du portefeuille de marché, σ_{am} la covariance entre le rendement du prix du CO_2 et r_t^m , et σ_{mm} la variance de r_t^m . Le premier terme $r_t^f p_t$ représente la règle de Hotelling concernant l'arbitrage inter-temporel de minimisation des coûts dans l'EU ETS. Le second terme $\frac{\sigma_{am}}{\sigma_{mm}}$ est la prime de risque liée au fait de détenir des quotas parmi un portefeuille diversifié d'actifs.

L'expression $(r_t^m - r_t^f)$ représente l'excès de rendement sur le portefeuille de marché à la date t .

Etant donné que la valeur anticipée de p_{t+1} est seulement connue avec erreur à la date t , nous substituons $E_t p_{t+1}$ par $p_{t+1} + \epsilon_{t+1}$:

$$p_{t+1} - p_t = r_t^f p_t + \frac{\sigma_{am}}{\sigma_{mm}} (r_t^m - r_t^f) p_t - \psi_t + \epsilon_{t+1} \quad (1.5)$$

où la variable dépendante est la série de prix du CO_2 prise en différence première logarithmique, et ϵ le terme d'erreur.

Ensuite, en supposant que le *convenience yield* est constant ($\psi_t = \psi$), et en ajoutant des variables dummy pour capturer le changement structurel et éliminer les effets des changements de prix extrêmes, nous obtenons :

$$p_{t+1} - p_t = \alpha + \beta_1(L)p_t + \beta_2 r_t^f p_t + \beta_3 (r_t^m - r_t^f) p_t + \beta_4 break + \beta_5 p_t min + \beta_6 p_t max + \epsilon_{t+1} \quad (1.6)$$

avec $\alpha = -\psi$, $\beta_2 = \frac{\sigma_{am}}{\sigma_{mm}}$, *break* la variable dummy caractéristique de la période après le changement structurel d'avril 2006, *p_t min* et *p_t max* les variables dummy prenant en compte, respectivement, les plus faibles et les plus fortes valeurs des changements de prix. L est un opérateur de retard tel que $L X_t = X_{t-n}$ où n est un entier, et $(X)L$ des polynômes de retard. Dans l'eq.(1.6), l'hypothèse nulle $\beta_1 = 1$ teste la règle de Hotelling, et β_2 contient l'information concernant la prime de risque du MEDAF pour les quotas de CO_2 , calculée comme la différence entre le rendement anticipé des quotas et le rendement d'un actif sans risque.

Nous détaillons ensuite les variables de politique environnementale utilisées dans nos estimations.

Contrainte de politique environnementale

Les prix des quotas de Phases I et II reflètent différentes contraintes de politique environnementale, telles que définies par les PNAQs I et II. En présence d'une restriction sur le transfert de quotas inter-périodes, nous cherchons à capturer la déconnexion entre les changements de prix du CO_2 des Phases I et II en analysant

la relation entre les prix spot et futures, ainsi que l'impact des annonces concernant la restriction du transfert de quotas inter-périodes contenues dans les PNAQs II.

D'après la relation *cost-of-carry*, et sans coût de stockage des quotas de CO_2 , les prix spot et futures sont reliés par la relation $S_t = F_T e^{-r(T-t)}$ avec S_t le prix spot à la date t , F_T le prix du contrat futures avec échéance en T et r le taux d'intérêt (Working (1949), Brennan (1958)). Cette condition de non-arbitrage indique que le seul coût d'acheter une matière première à la date t et de la délivrer à la maturité T est lié à l'intérêt écoulé. Les agents subissent le coût d'opportunité d'acheter l'actif, mais en retour ils bénéficient du fait de posséder la matière première, et de pouvoir l'échanger jusqu'à maturité. De même, les prix futures sont reliés par la relation $F_{T_1} e^{-r(T_1-t)} = F_{T_2} e^{-r(T_2-t)}$ avec $T = \{1, 2\}$ des contrats ayant des dates de maturité différentes. Nous calculons la prime entre le prix spot du CO_2 et chaque contrat futures de maturité $i = \{\text{décembre 2006, décembre 2007, décembre 2008}\}$, ainsi que la prime entre futures de différentes maturité, en actualisant les prix futures du taux d'intérêt et du temps restant avant la date échéance de chaque contrat, conformément à la formule du *cost-of-carry*. Nous obtenons cinq variables qui peuvent être utilisées soit sur l'échantillon complet, soit sur l'un des sous-échantillons considérés selon leur date de maturité : il s'agit de la prime entre le prix spot et les contrats futures de maturité décembre 2006, décembre 2007 et décembre 2008 d'une part, et de la prime entre les contrats futures de maturité décembre 2006-décembre 2007 et décembre 2007-décembre 2008 d'autre part.

Le principal intérêt d'introduire des prix futures avec différentes dates de maturité consiste à capturer les effets de la restriction du transfert de quotas inter-périodes sur la structure par terme des futures, qui peut être définie comme tout changement observé à travers plusieurs dates de maturité dans les prix des futures à la date t (Bessembinder et al. (1995)). La structure par terme des prix futures décrit plusieurs points du support de l'actif que les firmes présentes sur le marché anticipent que le prix spot suivra. Rappelons qu'en l'absence de coût de stockage des quotas de CO_2 , la relation *cost-of-carry* décrit la structure par terme des futures basée sur une condition de non-arbitrage : la pente de la structure par terme des futures est égale au coût net de détention de l'actif entre différentes dates de

maturité, et doit donc être actualisée uniquement au taux d'intérêt sans risque.

Afin de mieux prendre en compte les effets de la restriction du transfert de quotas inter-périodes en France et en Pologne, nous procédons à deux régressions en fonction du pays considéré :

$$\begin{aligned}
p_{t+1} - p_t = & \alpha + \beta_1(L)p_t + \beta_2r_t^f p_t + \beta_3(r_t^m - r_t^f) p_t \\
& + \beta_4break + \beta_5p_tmin + \beta_6p_tmax \\
& + \beta_7spot/futurespr_{i,t} + \beta_8futurespr_{i,t} \\
& + \beta_9bansub_{j,t} + \beta_{10}banadd_{j,t} + \beta_{11}bandec_{j,t} + \epsilon_{t+1}
\end{aligned} \tag{1.7}$$

avec $spot/futurespr_{i,t}$ et $futurespr_{i,t}$ les primes spot/futures et entre futures calculées comme la différence entre, respectivement, le prix spot du CO_2 et les prix futures, et entre deux contrats futures de maturité $i = \{\text{décembre 2006, décembre 2007, décembre 2008}\}$ en fonction de l'échantillon considéré, $bansub_{j,t}$ la soumission officielle des PNAQs II dans le pays considéré, $banadd_{j,t}$ toute information additionnelle concernant les PNAQs II, $bandec_{j,t}$ la décision finale concernant les PNAQs II dans le pays $j = \{\text{France, Pologne}\}$. Pour chaque pays, la variable dummy prend la valeur de 1 quand l'information relève soit de la soumission officielle, soit de l'addition d'informations, soit de la décision finale concernant les PNAQs II, et 0 sinon comme détaillé dans le Tableau 1.1 (voir l'Annexe A).

Enfin, nous expliquons comment nous prenons en compte l'influence potentielle de chocs extérieurs sur les changements de prix du CO_2 liés aux variables des prix des énergies et aux évènements climatiques.

L'influence des chocs sur les marchés des énergies et des évènements de températures non anticipés

Afin d'éviter une mauvaise spécification du modèle estimé, nous introduisons les prix du Brent et du gaz naturel, ainsi que des évènements climatiques extrêmes identifiés dans la littérature existante comme étant les principaux fondamentaux du prix du CO_2 , et que nous étudions en détails dans le Chapitre 2 (Mansanet-Bataller et al. (2007), Alberola et al. (2008)).

Cette dernière étape sert de test de robustesse des résultats obtenus dans l'eq.(1.7), qui devient :

$$\begin{aligned}
p_{t+1} - p_t = & \alpha + \beta_1(L)p_t + \beta_2 r_t^f p_t + \beta_3 (r_t^m - r_t^f) p_t \\
& + \beta_4 break + \beta_5 p_t min + \beta_6 p_t max \\
& + \beta_7 spot/futurespr_{i,t} + \beta_8 futurespr_{i,t} \\
& + \beta_9 bansub_{j,t} + \beta_{10} banadd_{j,t} + \beta_{11} bandec_{j,t} \\
& + \beta_{12} brent + \beta_{13} ngas + \beta_{14} Win07 + \epsilon_{t+1}
\end{aligned} \tag{1.8}$$

avec *brent* la série de prix du brent, *ngas* la série de prix du gaz naturel³⁵ et *Win07* l'évènement de températures extrêmes relatif aux mois de janvier-février 2007, caractéristiques d'un hiver plus chaud que la moyenne saisonnière³⁶. Dans la sous-section suivante, nous présentons la base de données utilisée dans notre étude.

1.2.3 Base de données

Le Chapitre précédent détaille les prix des énergies et variables de températures utilisés dans les Chapitres 1 et 2.

Notons que, dans cette deuxième section du Chapitre 1, l'introduction du prix du brent et du gaz naturel dans l'eq.(1.8) sert uniquement de test de robustesse des résultats concernant la restriction du transfert de quotas inter-périodes obtenus dans l'eq.(1.7). Notons aussi que l'introduction de variables climatiques ici ne sert qu'à tester la robustesse des effets obtenus concernant la restriction du transfert de quotas inter-périodes sur les changements de prix du CO_2 .

De plus, nous détaillons ci-dessous la source des données utilisées spécifiquement dans le Chapitre 1. Les statistiques descriptives sont incluses dans le Tableau 1.6 (voir l'Annexe A).

³⁵D'après Helfand et al. (2006), nous construisons les variables de l'énergie sous forme d'erreurs de prévision à un pas.

³⁶La construction des différentes variables de températures est explicitée dans le Chapitre 2.

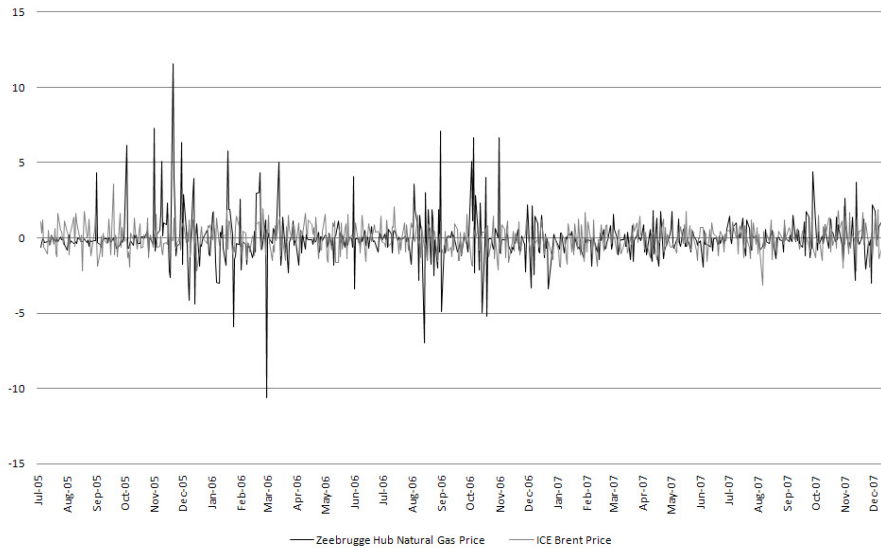


FIG. 1.2 – Séries de prix du gaz naturel et du Brent transformées en erreurs de prévision du 1er juillet 2005 au 17 décembre 2007 d'après Zeebrugge Hub et ICE

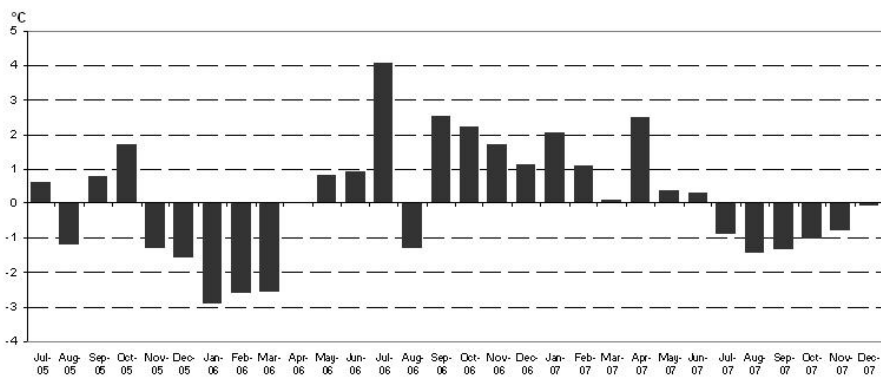


FIG. 1.3 – Index européen de températures de juillet 2005 à décembre 2007 d'après Bluenext, et Tendances Carbone de la Caisse des Dépôts

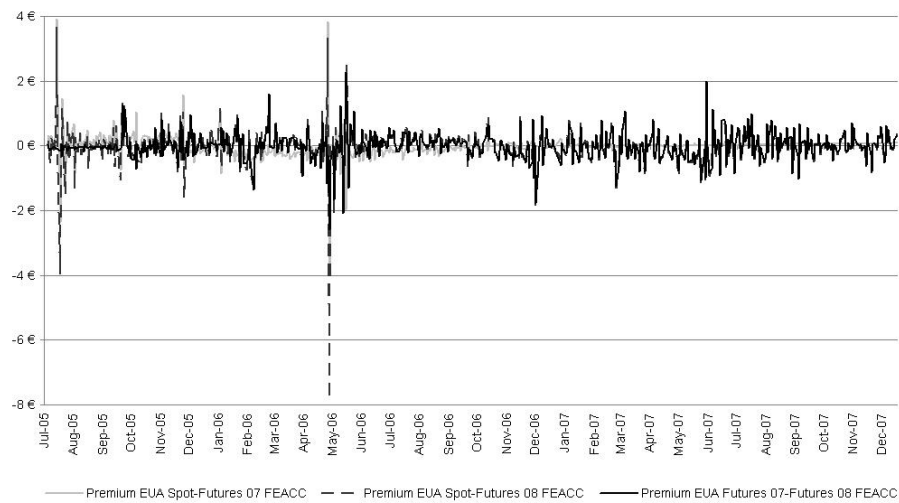


FIG. 1.4 – Primes entre les prix spot du CO_2 et les futures de maturité décembre 2007-décembre 2008 transformées en erreurs de prévisions du 01/07/2005 au 17/12/2007 d'après BlueNext et ECX

Prix futures du carbone

Nous utilisons la série de prix spot (p_t in € par tonne de CO_2) négociée sur BlueNext³⁷, et les prix quotidiens des contrats futures avec différentes dates de maturité allant de décembre 2005 à décembre 2008 d'après ECX. L'échantillon complet va du 1er juillet 2005 au 17 décembre 2007, c'est à dire du lancement de la place de marché Bluenext jusqu'à la date de maturité du contrat futures décembre 2007. Les prix futures ont été transformés en erreurs de prévision à un pas (Helfand et al. (2006)) dans le but de capturer le rôle de l'incertitude sur le marché, et de modéliser l'apport d'informations venant de changements non-anticipés dans les conditions de marché qui peuvent affecter les changements de prix du CO_2 (voir la Figure 1.2).

³⁷Voir le Chapitre précédent pour plus de détails sur la série de prix spot du CO_2 utilisée.

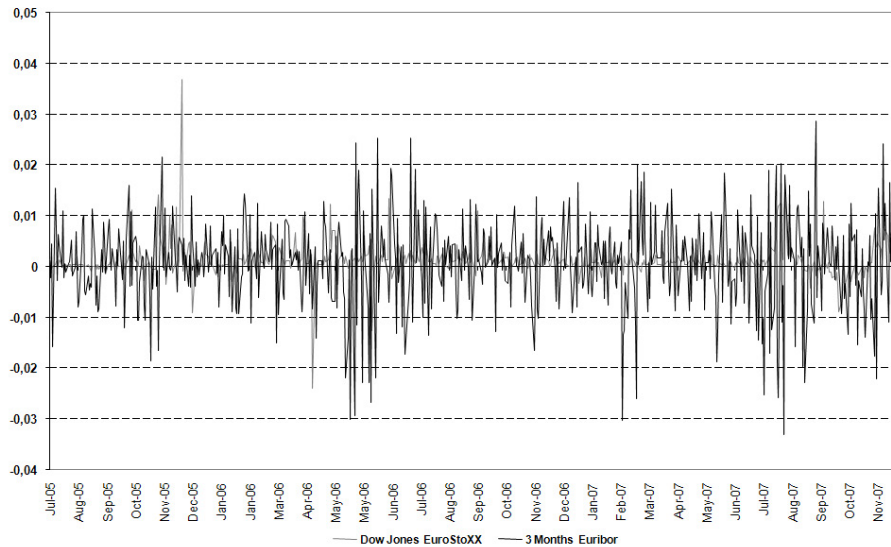


FIG. 1.5 – Taux de rendement de l'Euribor à trois mois et de l'indice Dow Jones EURO STOXX 50 en points de pourcentage avec une fréquence quotidienne du 1er juillet 2005 au 17 décembre 2007 d'après la Banque de France et Euronext

Taux de rendement du MEDAF

Le rendement du taux d'intérêt sans risque (r_t^f) est l'Euribor à trois mois présenté en pourcentage annuel avec une fréquence quotidienne. Le taux de rendement du portefeuille de marché composé d'actifs risqués (r_t^m) est le rendement annuel de l'indice Dow Jones EURO STOXX 50 avec une fréquence quotidienne. Nous convertissons chaque observation quotidienne en un taux d'intérêt en base quotidienne³⁸. r_t^f et r_t^m sont donc exprimés en points de pourcentage avec une fréquence quotidienne (voir la Figure 1.3).

³⁸Pour r_t^f , nous utilisons la formule suivante : $r = (1 + \frac{i}{4})^4 - 1$ avec r le taux d'intérêt annuel avec une fréquence quotidienne, et i le taux d'intérêt trimestriel avec une fréquence quotidienne. Pour r_t^m , nous utilisons la formule suivante : $r = (1 + \frac{i}{250})^{250} - 1$ avec r le taux d'intérêt annuel avec une fréquence quotidienne, et i le taux d'intérêt quotidien.

Tests de stationnarité

Nos résultats économétriques peuvent être biaisés si la variable dépendante n'est pas stationnaire. C'est pourquoi nous testons la stationnarité de toutes les séries de prix, ainsi que leur différence première. Une complication possible des tests de racine unitaire pour la stationnarité réside dans la présence de changements structurels dans les séries temporelles, qui peuvent rendre le rejet d'une racine unitaire plus difficile (Perron (1989)). Les tests usuels de racine unitaire (ADF, PP, KPSS) ont été appliqués. Toutes les séries temporelles sont caractérisées par l'absence de racine unitaire en différence première logarithmique. En d'autres termes, toutes les séries temporelles non différenciées sont intégrées d'ordre 1 (I(1)).

1.2.4 Résultats d'estimation et discussion

Les résultats des eq.(1.7) et (1.8) pour l'échantillon complet et les deux sous-échantillons sont présentés dans les Tableaux 1.2 à 1.4 (voir l'Annexe A). Les coefficients sont estimés par la méthode des moindres carrés ordinaires, en utilisant la procédure de Newey-West pour corriger la corrélation sérielle et générer des écarts-types robustes. La variable dépendante est la série de prix du CO_2 prise en différence première logarithmique³⁹. L'examen de la fonction d'autocorrélation de la variable dépendante conduit à identifier le vrai processus générateur de données comme étant un ARMA(p,q) d'ordre 1. Cet examen est confirmé par le fait que les coefficients auto-régressifs et de moyenne mobile sont statistiquement différents de zéro. La qualité des régressions est vérifiée à travers les tests de diagnostic suivants : le R^2 , le R^2 ajusté, la p-value de la statistique F-test ($F - Stat$), la statistique Durbin-Watson ($D.W$), la p-value du test Breush-Godfrey de corrélation en série du multiplicateur de Lagrange (LM), la p-value du test d'hétéroscédasticité de White ($White test$), le critère d'information d'Akaike (AIC), et le critère d'information de Schwarz (SC). Pour chaque régression, le test du multiplicateur de Lagrange indique que les résidus ne sont pas autocorrélés. Les tests de robustesse concernant le choix du taux de rendement du portefeuille de marché com-

³⁹Nous sommes donc intéressés par capturer le taux de croissance de la variable dépendante.

posé d'actifs risqués, la détermination des changements structurels, et la présence d'hétéroscédasticité dans les coefficients estimés sont détaillés en fin de sous-section. Détaillons tout d'abord les résultats obtenus dans le cadre de l'échantillon complet.

Echantillon complet

Le Tableau 1.2 (voir l'Annexe A) présente les résultats de l'échantillon complet. Les régressions (1) et (3) montrent les estimations de l'eq.(1.7) pour, respectivement, la France et la Pologne. Le R^2 ajusté et le R^2 prennent la valeur, respectivement, de 7.5% et 12.1%. Concernant la validation de la règle de Hotelling, la significativité de $r_t^f p_t$ dans les régressions (1) et (3) n'est pas l'indicateur approprié, étant donné que ces régressions testent la restriction $\beta_1 = 0$. Or, nous sommes intéressés ici par l'hypothèse nulle $\beta_1 = 1$. C'est pourquoi nous calculons l'intervalle de confiance (IC) où le paramètre β a une probabilité de 95% de se trouver d'après la formule : $IC = [\hat{\beta} \pm 2.11 * Ecart - type]$. Ces calculs, présentés dans le Tableau 1.5, nous conduisent à rejeter la règle de Hotelling sur l'échantillon complet. Le rejet de cette règle suggère que, en présence des restrictions sur le transfert de quotas inter-périodes, le marché du carbone n'a pas réuni durant 2005-2007 les conditions nécessaires pour un développement du prix intertemporellement efficient. D'autres commentaires peuvent être faits à partir de ce modèle Hotelling-MEDAF. Le manque de significativité du coefficient β_2 suggère que les quotas de CO_2 ne supportent pas de prime de risque au sein d'un portefeuille diversifié de matières premières. La variable dummy $ptmin$ est significative au seuil de 5% dans les régressions (1) et (3), ce qui améliore la qualité de ces régressions. De même, la variable dummy de changement structurel $break$ est significative au seuil de 1% et négative, ce qui est conforme au signe attendu suite au fort ajustement de prix du mois d'avril 2006.

La relation entre le prix spot du CO_2 et le prix futures de maturité décembre 2008, $spot/dec08pr$, contient une information statistiquement significative au seuil de 1% concernant les changements de prix du spot du CO_2 sur l'échantillon complet (Tableau 1.2, régressions (1) et (3)). Le signe positif suggère qu'entre les mois

de juillet 2005 et décembre 2007, le contrat futures de maturité décembre 2008 a le potentiel de prévoir les changements du prix futur du spot⁴⁰. Ce résultat s'explique par les annonces de la Commission Européenne de critères de validation plus restrictifs pour les PNAQs II. Cette plus grande rareté de quotas, attendue par les opérateurs de marché sur le moyen-terme, est reflétée par le signe positif du coefficient pour le contrat futures de maturité décembre 2008. La significativité de la variable *spot/dec08pr* sur l'échantillon complet fait référence à la situation normative que le marché de quotas aurait dû rencontrer : en l'absence de restrictions sur le transfert de quotas inter-périodes, le développement du prix du CO_2 aurait dû être cohérent avec l'évolution du prix du contrat futures de maturité décembre 2008. Le fait que cette relation soit vérifiée sur l'échantillon complet, et ne soit plus valide dans les sous-échantillons, constitue un résultat principal de notre étude : la structure par terme des futures reflète les changements dans les anticipations des opérateurs de marché en différents points du support du prix du CO_2 , et permet donc de capturer les effets de la restriction sur le transfert de quotas inter-périodes⁴¹. La non-significativité des variables *spot/dec07pr* et *dec07/dec08pr* suggère que l'inclusion de *spot/dec08pr* dans notre modèle contribue à une meilleure explication des changements de prix du CO_2 . Ce commentaire concernant la non-significativité d'autres variables explicatives, détaillées dans le Tableau 1.6, reste valable pour les autres régressions présentées dans cette section.

Les variables institutionnelles *bansub* concernant la soumission officielle des PNAQs II à la Commission Européenne par la France (au mois de septembre 2006) et la Pologne (au mois de juin 2006) sont toutes les deux significatives au seuil de 1% (Tableau 1.2, régressions (1) et (3)). Leur signe positif signifie que les restrictions possibles sur le transfert de quotas inter-périodes contenues dans ces PNAQs II contribue à une meilleure explication des bas prix des quotas de CO_2 jusqu'à la fin de la Phase I. De même, les coefficients positifs et significatifs au seuil de 1% des variables dummy *banfrdec* et *banpldec* (Tableau 1.2, régressions

⁴⁰Voir l'analyse de Fama et French (1987) concernant l'interprétation des résultats de régression avec les primes entre prix spot et futures.

⁴¹Rappelons qu'au début de la période, le transfert de quotas inter-périodes était autorisé en France et en Pologne, et n'a été restreint que tardivement au cours de la Phase I.

(1) et (3)) confirment que la décision finale des PNAQs II par la Commission Européenne officialisant la restriction du transfert de quotas inter-périodes contribue à l'explication de changements de prix du CO_2 décroissants asymptotiquement vers zéro. La non-significativité de la variable dummy *banadd* peut s'expliquer par le fait que l'information contenue dans ces communications entre les Etats-Membres et la Commission Européenne n'a pas été utilisée par les opérateurs de marché pour confirmer la probabilité de bannir le transfert de quotas inter-périodes. Ce commentaire s'applique aux autres régressions présentées dans cette section.

Dans le Tableau 1.2, les régressions (2) et (4) montrent les résultats d'estimation de l'eq.(1.8). La stabilité des coefficients estimés prouve la robustesse de nos résultats suite à l'introduction d'autres chocs provenant des marchés des énergies et des évènements climatiques. Ce commentaire s'applique aux autres régressions de cette section. Concernant les prix des énergies, *ngas* et *brent* affectent positivement les changements de prix du CO_2 aux seuils de, respectivement, 5% et 10%, ce qui est conforme à la littérature concernant les fondamentaux du prix du CO_2 (Mansanet-Bataller et al. (2007)). Les changements non-anticipés de températures durant les mois de janvier-février 2007, capturés par la variable *Win07*, sont statistiquement significatifs au seuil de 5% et négatifs, ce qui est conforme au fait que cet évènement climatique extrême est plus chaud que la moyenne décennale, conduisant à moins de demande de chauffage, et donc moins de demande de quotas de CO_2 pour couvrir les émissions⁴².

Intéressons-nous à présent aux résultats d'estimation sur la période "avant l'évènement de conformité".

Sous-échantillon "avant l'évènement de conformité"

Le Tableau 1.3 présente les résultats des eq.(1.7) et eq.(1.8) pour le sous-échantillon "avant l'évènement de conformité" dans, respectivement, les régressions (5) et (6). Le R^2 ajusté et le R^2 prennent la valeur, respectivement, de 42% et 48.4%.

Les variables dummy institutionnelles liées aux décisions de restriction du

⁴²Voir le Chapitre 2 pour le détail de ces effets liés aux températures.

transfert de quotas inter-périodes de la France et de la Pologne ne sont pas incluses entre les mois de juillet 2005 et avril 2006, étant donné qu'elles ont lieu *après* l'évènement de conformité. De même que pour l'échantillon complet, le calcul des intervalles de confiance nous conduit à rejeter la règle de Hotelling (voir Tableau 1.5). La variable dummy *ptmin* est significative au seuil de 1%.

Concernant les variables établissant la relation entre les prix spot et futures, les résultats d'estimation dans la régression (5) montrent que à la fois *Spot/Dec07pr* et *Spot/Dec08pr* sont significatives au seuil de, respectivement, 1% et 5%. Comme nous l'avons expliqué dans la sous-section précédente, le fait que la relation *cost-of-carry* soit vérifiée entre la série de prix spot du CO_2 et les contrats futures de maturité décembre 2007 et décembre 2008 correspond au signal de prix de moyen-terme contenu dans la structure par terme des futures, de sorte que les anticipations des agents sont cohérentes dans le temps. Le signe positif est conforme à la structure de prix strictement *croissants* du CO_2 durant cette sous-période.

L'introduction des prix des énergies dans la régression (6) ne change pas qualitativement les résultats obtenus. Les variables *brent* et *brent* retardée d'une période sont positives et significatives au seuil de 1%, ce qui est conforme à la littérature précédente (Alberola et al. (2008)). Nous ne pouvons pas détecter l'influence des changements non-anticipés de températures durant cette première sous-période. Nous étendons notre analyse au second sous-échantillon dans la sous-section suivante.

Sous-échantillon "après l'évènement de conformité"

Le Tableau 1.4 présente les résultats des régressions des eq.(1.7) et (1.8) pour le sous-échantillon "après l'évènement de conformité" dans, respectivement, les régressions (7) à (10). Le R^2 ajusté et le R^2 prennent la valeur, respectivement, de 4.8% et 9%. Le calcul des intervalles de confiance conduit également au rejet de la règle de Hotelling (voir le Tableau 1.5). La variable dummy *ptmax* est significative et positive, ce qui améliore la qualité de cette régression. Contrairement au sous-échantillon "avant l'évènement de conformité", seule la variable *spot/dec07pr* entre les changements de prix du CO_2 et le prix du contrat futures de maturité décembre

2007 demeure significatif au seuil de 5% (régressions (7) à (10), Table 1.4).

Nous pouvons comparer les résultats obtenus ici avec ceux des deux autres échantillons. Par rapport au sous-échantillon "avant l'évènement de conformité", seul le contrat futures de maturité décembre 2007 permet de prévoir les changements du prix spot futur. Par rapport à l'échantillon complet, la relation entre les changements de prix du CO_2 et le contrat futures de maturité décembre 2008 est rompue. Ce résultat démontre statistiquement l'inspection visuelle des données que nous avons effectuée dans la Figure 1.1 : "après l'évènement de conformité", seule la relation *cost of carry* est vérifiée entre les changements de prix spot et le contrat futures de maturité à la fin de la Phase I. A cause de la restriction sur le transfert de quotas inter-périodes, le prix spot du CO_2 durant la Phase I est déconnecté des contrats futures valides durant la Phase II. Notre analyse montre que cette déconnexion est due à la non-validité des quotas stockés *après* l'évènement de conformité 2007 pour une utilisation en Phase II. Contrairement à la situation normative décrite pour l'échantillon complet, la restriction du transfert de quotas inter-périodes a empêché l'émergence d'un signal prix cohérent avec les anticipations des agents durant la Phase II, contenues dans le contrat de maturité décembre 2008. Les variables dummy *bandec* pour la France et la Pologne confirment statistiquement au seuil de 1% l'effet de la décision finale de la Commission Européenne de bannir le transfert de quotas inter-périodes sur les prix bas du CO_2 jusqu'à la fin de la Phase I (régressions (7) à (10)). Ces résultats sont robustes à l'introduction des changements de températures non-anticipés de la variable *Win07*. Dans la suite de cette sous-section, nous discutons brièvement les résultats obtenus dans les différents échantillons.

Discussion

Nous discutons tout d'abord l'échec de la règle de Hotelling, puis la question de l'apprentissage institutionnel, et enfin l'influence des chocs des marchés des énergies et des évènements non-anticipés de températures. Nous présentons également dans cette sous-section nos tests de robustesse.

Sur l'échec de la règle de Hotelling

Comme le montre le Tableau 1.5, l'échec de la règle de Hotelling durant la Phase I de l'EU ETS n'est pas en soit surprenant. D'après Heal (2007), même en cas d'échec, l'analyse de la règle de Hotelling permet de mieux comprendre l'utilisation inter-temporelle de la ressource dans le temps dans de nombreuses applications empiriques. Dans le contexte de l'EU ETS, le rejet de la règle de Hotelling implique que le contexte institutionnel durant 2005-2007 n'a pas rempli les conditions nécessaires pour l'émergence d'un signal prix inter-temporellement efficient. On peut soutenir que la restriction inter-périodes sur le transfert de quotas a dominé tout lissage des efforts d'abattement intra-période. En présence d'une structure d'information complète initialement et durant toute la Phase I, et sans restrictions à l'échange de quotas entre périodes, alors on pourrait supposer que le prix du quota croisse de façon continue, malgré quelques fluctuations, sur la période observée. En l'absence d'information complète, notre analyse montre que l'introduction d'autres facteurs affectant les anticipations des agents, tels que les événements de conformité, l'étude des relations de prix entre les Phases I et II, l'influence des prix des énergies et des variables climatiques, n'est pas suffisante pour faire émerger un signal de prix suffisamment fort d'après les données. Le rejet de ce test durant la période complète et les sous-périodes correspondantes indique donc que la restriction sur le transfert de quotas inter-périodes a un pouvoir explicatif élevé pour l'interprétation des bas niveaux de prix spots du carbone observés jusqu'à la fin de la Phase I⁴³.

Sur l'apprentissage institutionnel

Suivant l'annonce des résultats de conformité 2005, la plupart de l'attention des observateurs de marché s'est concentrée sur la chute soudaine des prix du CO₂,

⁴³Voir également Helfand (2006) et Kronenberg (2006) pour une discussion exhaustive des critères pouvant expliquer l'échec de la règle de Hotelling, parmi lesquels le fait que les quotas soient caractérisés par des coûts d'extraction nuls, et la prise en compte des interactions stratégiques entre firmes.

et moins sur les relations entre les prix des Phases I et II. "Avant l'évènement de conformité" du mois d'avril 2006, le prix spot est connecté aux prix des contrats futures de maturité décembre 2007 et décembre 2008. La relation *cost of carry* est vérifiée entre les prix spot et les futures de différentes maturité, ce qui est conforme à la structure par terme des futures. "Après l'évènement de conformité", les opérateurs de marché forment leurs anticipations de façon plus précise dans un contexte de faible contrainte environnementale associée à une restriction du transfert de quotas inter-périodes, ce qui explique le divorce entre le prix spot du CO₂ et le prix du contrat futures de maturité décembre 2008. De plus, la soumission officielle des PNAQs II par la France et la Pologne, dans lesquels chaque Etat-Membre indique sa volonté progressive de restreindre le transfert de quotas inter-périodes, et la décision finale par la Commission Européenne affectent significativement les changements de prix du CO₂. Ces communications entre les Etats-Membres et la Commission Européenne contribuent à une meilleure explication des bas niveaux de prix du CO₂ enregistrés jusqu'à la fin de la Phase I. Etant donné que les changements de prix du CO₂ sont statistiquement affectés par les évènements de conformité tel que celui d'avril 2006, par la restriction du transfert de quotas inter-périodes par la France et la Pologne, et par la déconnexion dans la structure par terme des futures entre des contrats de maturité différentes, un résultat principal de notre étude concerne l'apprentissage institutionnel ayant lieu au cours de la Phase I de l'EU ETS, à la fois du point de vue des opérateurs de marché et du régulateur. Le signal prix de moyen terme du CO₂ est fourni par le contrat futures de maturité décembre 2008, qui est lié aux prix de Phase II. Le prix spot de Phase I a seulement été en mesure de fournir un signal prix efficient sur le court terme, jusqu'à la restriction du transfert de quotas inter-périodes.

Sur l'influence des chocs des marchés de l'énergie et des évènements non-anticipés de températures

Comme indiqué par Mansanet-Bataller et al. (2007), les changements de prix du CO₂ sont affectés par les chocs sur les marchés du brent et du gaz naturel, ainsi que

par les évènements climatiques. Notre argument dans cette sous-section consiste simplement à vérifier que nos résultats concernant la restriction du transfert de quotas inter-périodes sont robustes à l'introduction de ces chocs, sachant que nous développons les fondamentaux du prix du CO₂ dans le Chapitre 2.

Tests de robustesse

Le fait d'ajouter des variables des prix des énergies et des évènements climatiques constitue un premier test de robustesse des coefficients estimés. Concernant le choix du taux de rendement sur un portefeuille diversifié, l'inclusion de l'indice Euronext 100 à la place du Dow Jones EURO STOXX 50 ne change pas les résultats obtenus, étant donné que les places de marché sont fortement corrélées. La règle de Hotelling demeure rejetée dans tous les modèles. Quand le test de White indique la présence d'hétéroscédasticité, nous spécifions un modèle GARCH(p,q) d'ordre 1 en utilisant la méthode de Bollerslev Wooldrige pour générer des écarts-types robustes. Les coefficients estimés par la procédure GARCH sont stables et significatifs, à la fois dans l'équation de la moyenne et de la variance. Etant donné que les deux techniques d'estimations produisent des résultats similaires, nous présentons seulement les coefficients estimés par la méthode des moindres carrés ordinaires et la procédure de Newey West par souci de simplicité.

Résumons les principaux résultats obtenus dans notre analyse empirique.

Concernant le stockage et l'emprunt de quotas à l'intérieur de la Phase I, nous montrons statistiquement que l'allocation n'a pas permis de créer une rareté de quotas suffisante pour faire émerger la règle de Hotelling (Slade et Thille (1997), Schennach (2000), Helfand et al. (2006)). "Avant l'évènement de conformité", le prix élevé des quotas suggère que des mesures d'abattement précoces ont eu lieu dans l'EU ETS, de façon à être en conformité avec le plafond d'émissions. "Après l'évènement de conformité" et la correction des erreurs d'anticipations des agents concernant le montant d'abattement nécessaire pour assurer leur position de conformité, la restriction sur le transfert de quotas inter-périodes a limité des mesures d'abattement supplémentaires. Comme le notent Ellerman et Montero

(2007) concernant le marché du SO_2 aux Etas-Unis, ” *quand le stockage et l'emprunt intra-période sont autorisés sur un marché de quotas, on peut s'attendre à un niveau d'abattement et à des prix plus élevés durant les premières Phases du programme*”.

Concernant la restriction du transfert de quotas entre les Phases I et II, la relation *cost of carry* entre le prix spot du CO_2 et le contrat futures de maturité décembre 2008 n'est plus vérifiée ”après l'évènement de conformité”, à partir du moment où la Commission Européenne a communiqué sa décision finale dans les PNAQs II. Seul le contrat futures de maturité décembre 2007 est donc à même d'expliquer statistiquement les changements de prix du CO_2 durant cette seconde sous-période. Cette déconnexion entre les prix des Phases I et II s'éloigne fortement de l'échantillon complet. Nous avons en effet identifié sur l'ensemble de la période la prédominance du contrat futures de maturité décembre 2008 pour expliquer les changements de prix du CO_2 , c'est à dire dans une situation normative où les quotas auraient dû être transférables entre les Phases I et II. ”Avant l'évènement de conformité”, à la fois les contrats futures de maturité décembre 2007 et décembre 2008 sont statistiquement significatifs pour expliquer les changements de prix du CO_2 . Ce résultat est cohérent avec l'analyse concernant la structure par terme des futures (Bessembinder et al. (2005)). Cet effet important de la restriction du transfert de quotas inter-périodes est confirmée par notre analyse à partir de variables dummy concernant la soumission des PNAQs II par la France, la Pologne, et la décision finale de la Commission Européenne, contenant des informations pertinentes à cette restriction. Nos résultats sont robustes l'introduction des chocs des marchés des énergies et des évènements non-anticipés de températures, que nous étudions en détails dans le Chapitre 2.

Conclusion

Dans le Chapitre 1, nous avons étudié selon quelles conditions les règles de fonctionnement relatives au stockage et à l'emprunt de quotas peuvent être utiles au succès de la mise en place de marchés de permis d'émissions négociables tel que

l'EU ETS.

La première section du Chapitre 1 est consacrée à une revue de littérature des propriétés théoriques et de l'évidence empirique concernant la flexibilité intertemporelle des marchés de permis. Nous avons souligné les avantages et les inconvénients de tels mécanismes : tandis que le stockage fournit des incitations à des mesures d'abattement précoces, l'emprunt non restreint de permis peut conduire à une situation dommageable d'un point de vue environnemental avec une concentration des flux d'émissions sur certaines périodes. Ces effets potentiellement négatifs peuvent être compensés par l'introduction d'un taux d'intérêt spécifique aux quotas empruntés. La restriction des possibilités de stockage et d'emprunt de quotas conduit à une situation inefficace du point de vue de la minimisation des coûts, car les économies de coûts d'abattement réalisées ne peuvent pas être transférées dans le temps. En combinant cette remarque avec une allocation généreuse et gratuite de quotas, notre analyse confirme que l'EU ETS était en phase d'apprentissage durant 2005-2007, au prix de choix sous-optimaux concernant les mesures d'abattement. En présence de deux signaux de prix distincts en fonction des Phases I et II de l'EU ETS, nous pouvons conclure que sans le transfert de quotas inter-périodes, ce programme ne peut pas atteindre les gains attendus en terme d'efficience.

La deuxième section du Chapitre 1 étudie l'impact de la restriction du transfert de quotas entre les Phases I et II sur les changements de prix du CO₂ au cours de la période 2005-2007 dans l'EU ETS. Commencant à 8€ le 1er janvier 2005, le prix du quota a initialement augmenté aux alentours de 20-30€, avant de chuter suite aux résultats de la période de conformité 2005 au mois d'avril 2006, puis a tendu vers zéro à partir d'octobre 2006 suivant l'annonce par la Commission Européenne de critères de validation plus restrictifs des PNAQs II. La littérature précédente identifie parmi les principales explications de ces bas niveaux de prix des présomptions de sur-allocation, des efforts d'abattement précoces en 2005, et possiblement des coûts d'abattement décroissants en 2006 dû à l'interaction avec les marchés des énergies et aux évènements climatiques (Mansanet-Bataller et al. (2007), Ellerman et Buchner (2008)). Notre analyse montre que les règles de fonctionnement spécifiques au stockage et à l'emprunt de quotas entre les Phases

I et II contribuent également à ce bas niveau de prix.

Si l'on considère la Phase I de l'EU ETS comme une période d'apprentissage, ces résultats nous renseignent sur le possible sacrifice des mécanismes de stockage et d'emprunt de quotas, de façon à limiter le transfert d'inefficiences lors du passage du marché vers la Phase II. Enfin, pour que les Etats-Membres puissent utiliser à leur avantage les possibilités de stockage et d'emprunt de quotas dans leurs plans de long-terme de réduction des émissions, il apparaît utile que la Commission Européenne publie à la fin de chaque période de conformité le montant exact de quotas empruntés et stockés.

De façon à approfondir notre analyse sur le développement du signal prix dans l'EU ETS, nous conduisons dans le Chapitre 2 une analyse approfondie des fondamentaux du prix du CO_2 sur la période 2005-2007.

Annexes relatives au Chapitre 1

Annexe A

1.1 Stockage et emprunt de quotas : une revue de littérature de la modélisation économique, des règles de fonctionnement actuelles et des perspectives de réforme

Assigned Amount Unit	Les AAUs caractérisent les unités délivrées aux Parties de l'Annexe B. Ces unités sont échangeables entre pays de l'Annexe B et sont utilisés pour assurer la position de conformité avec l'objectif d'émissions. Chaque AAU est égal à une tonne de dioxyde de carbone, ou de gaz équivalents, émis dans l'atmosphère.
Certified Emission Reduction	Les CERs sont des unités échangées dans le cadre de l'Article 12 du Protocole de Kyoto. Ces unités sont générées par des projets réalisés dans les pays non-membres de l'Annexe B dans le cadre du Mécanisme de Développement Propre, et peuvent être utilisées pour la conformité des Parties de l'Annexe B à travers leurs cibles d'émissions du Protocole de Kyoto, et de l'EU ETS dans la limite de 13,4% en moyenne. Chaque CER est égal à une tonne de dioxyde de carbone, ou de gaz équivalents, émis dans l'atmosphère.
Emission Reduction Unit	Les ERUs sont des unités échangées dans le cadre de l'Article 6 du Protocole de Kyoto. Ces unités sont générées par des projets réalisés dans les pays membres de l'Annexe B dans le cadre du mécanisme de Mise en Oeuvre Conjointe, et peuvent être utilisées pour la conformité des Parties de l'Annexe B. Chaque ERU est égal à une tonne de dioxyde de carbone, ou de gaz équivalents, émis dans l'atmosphère.
Removal Unit	Les RMUs sont des unités issues sur la base du retrait de gaz à effet de serre dans le cadre des projets LULUCF liés aux activités d'utilisation des sols et des ressources forestières d'après les Articles 3.3 et 3.4 du Protocole de Kyoto. Ces unités peuvent être utilisées pour la conformité des Parties de l'Annexe B. Chaque RMU est égal à une tonne de dioxyde de carbone, ou de gaz équivalents, émis dans l'atmosphère.

TAB. 1.1 – Glossaire des unités utilisées dans le Protocole de Kyoto

Ces unités sont détaillées dans l'Annexe B des objectifs de réduction d'émissions des Etats-Membres de l'Annexe B concernés par le Protocole de Kyoto. Elles sont valables pour la conformité des Membres, et sont égales à 1 tonne de CO₂ émise dans l'atmosphère, ou leur équivalent en autres gaz à effet de serre.

Programme	gaz	Mécanismes de stockage et d'emprunt	Unités en banque	Quotas échangés en % des émissions annuelles
<i>Marchés de permis aux Etats-Unis</i>				
Programme de lutte contre les pluies acides	SO ₂	Pas de limite sur le stockage	11.62 millions	75% à 180%
RECLAIM (Région du grand Los Angeles)	NO _x	Pas de limite sur le stockage. Les quotas en surplus peuvent être vendus à un acheteur avec une période de conformité ultérieure. Les quotas peuvent être achetés avec des dates de conformités ultérieures.	0	20 % to 125%
	SO _x	idem	0	10% to 105%
<i>Marchés de permis internationaux</i>				
Mécanismes de Kyoto	gaz à effet de serre	Les unités stockées entre 2008-2012 et les périodes d'engagement suivantes sont restreintes comme suit : - Les RMUs ne peuvent pas être transférés ; - Les ERUs, qui n'ont pas été convertis à partir de RMUs, peuvent être transférés avec un maximum de 2.5% du montant total de quotas alloué à chaque Etat-Membre ; - Les CERs peuvent être transférés avec un maximum de 2.5% du montant total de quotas alloué à chaque Etat-Membre ; - Les AAUs peuvent être transférés sans restriction.		

TAB. 1.2 – Résumé des mécanismes de stockage et d'emprunt de quotas et liquidité sur plusieurs marchés de permis d'émissions négociables d'après Haites (2006)

1.3 Les effets de la restriction du stockage inter-périodes sur le prix européen du carbone : évidence empirique de la Phase I (2005-2007)

France		Pologne						
	Submission des PNAQs II	Information supplémentaire	Décision de la Commission	PNAQs II	Submission des PNAQs II	Information supplémentaire	Décision de la Commission	PNAQs II
30/06/2006	Lettres des Etats-Membres à la Commission				1			1
06/07/2006	Enregistrement par la Commission				1			1
28/09/2006	Lettres des Etats-Membres à la Commission	1		1				
28/09/2006	Enregistrement par la Commission	1		1				
27/10/2006	Lettres des Etats-Membres à la Commission	1		1				
08/11/2006	Enregistrement par la Commission	1		1				
28/11/2006	Retrait des Etats-Membres	1		1				
29/12/2006	Lettres des Etats-Membres à la Commission	1		1		1		1
05/01/2007	Enregistrement par la Commission	1		1				
08/01/2007	Enregistrement par la Commission					1		1
09/01/2007	Lettres des Etats-Membres à la Commission					1		1
17/01/2007	Lettres des Etats-Membres à la Commission	1		1				
23/01/2007	Enregistrement par la Commission	1		1		1		1
14/03/2007	Lettres des Etats-Membres à la Commission	1		1				
15/03/2007	Lettres des Etats-Membres à la Commission	1		1				
26/03/2007	Validation des PNAQs par la Commission						1	1

TAB. 1.3 – Dates de communications officielles entre la France, la Pologne et la Commission Européenne concernant les PNAQs II d'après la DG Environnement

	Echantillon complet			
	France (1)	(2)	Pologne (3)	(4)
<i>Constant</i>	0.0002 (0.0014)	0.0001 (0.0015)	0.0001 (0.0014)	-0.0001 (0.0014)
<i>Break</i>	-0.0115*** (0.0040)	-0.0094*** (0.0036)	-0.0114*** (0.0040)	-0.0094*** (0.0036)
$r_t^f p_t$	-0.0506 (0.0483)	-0.0667 (0.0504)	-0.0490 (0.0478)	-0.0654 (0.0499)
$(r_t^m - r_t^f) p_t$	-0.0081 (0.0105)	-0.0117 (0.0107)	-0.0098 (0.0105)	-0.0132 (0.0108)
P_{tmin}	-0.0464** (0.0227)	-0.0577*** (0.0215)	-0.0458** (0.0226)	-0.0571*** (0.0214)
P_{tmax}	-	-	-	-
<i>Spot/dec07pr</i>	-	-	-	-
<i>Spot/dec08pr</i>	0.0257*** (0.0103)	0.0258*** (0.0104)	0.0255*** (0.0104)	0.0256*** (0.0104)
<i>Banfrsub</i>	0.0529*** (0.0111)	0.0437*** (0.0114)		
<i>Banfradd</i>	-	-		
<i>Banfrdec</i>	0.1014*** (0.0339)	0.0871*** (0.0323)		
<i>Banplsub</i>			0.0377*** (0.0143)	0.0329** (0.0141)
<i>Banpladd</i>			-	-
<i>Banpldec</i>			0.1027*** (0.0346)	0.0884*** (0.0328)
<i>Ngas</i>		0.0037** (0.0016)		0.0036** (0.0016)
<i>Brent</i>		0.0053* (0.0028)		0.0053* (0.0028)
<i>Win07</i>		-0.0071** (0.0034)		-0.0070** (0.0034)
<i>R - squ.</i>	0.0929	0.1209	0.0929	0.1210
<i>Adj.R - squ.</i>	0.0750	0.0992	0.0751	0.0993
<i>F - Stat</i>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<i>D.W.</i>	2.0372	2.0323	2.0364	2.0315
<i>LM test</i>	0.2823	0.3569	0.3057	0.3814
<i>White test</i>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<i>AIC</i>	-2.3141	-2.3358	-2.3141	-2.3359
<i>SC</i>	-2.2216	-2.2219	-2.2216	-2.2221

TAB. 1.4 – Résultats de l'échantillon complet

*** indique un seuil de significativité à 1%, ** à 5% et * à 10%. Ecart-type entre parenthèses. Les valeurs reportées pour la F-stat sont les p-values.

	"Avant l'évènement de conformité"	
	(5)	(6)
<i>Constant</i>	0.0033 (0.0022)	0.0025 (0.0021)
$r_t^f p_t$	-0.0142 (0.0099)	-0.0158 (0.0113)
$(r_t^m - r_t^f) p_t$	-0.0079* (0.0047)	-0.0088* (0.0051)
<i>P_tmin</i>	-0.0375*** (0.0106)	-0.0352*** (0.0107)
<i>P_tmax</i>	-	-
<i>Spot/dec07pr</i>	0.0217*** (0.0036)	0.0227*** (0.0038)
<i>Spot/dec08pr</i>	0.0054** (0.0023)	0.0068*** (0.0026)
<i>Ngas</i>		-
<i>Brent</i>		0.0042*** (0.0014)
<i>Brent(-1)</i>		0.0042*** (0.0014)
<i>Jul05</i>		-
<i>Win06</i>		-
<i>R - squ.</i>	0.4530	0.4846
<i>Adj.R - squ.</i>	0.4201	0.4476
<i>F - Stat</i>	0.0000	0.0000
<i>D.W.</i>	1.8523	1.8556
<i>LM test</i>	0.3767	0.3479
<i>White test</i>	0.0707	0.4551
<i>AIC</i>	-5.2729	-5.3119
<i>SC</i>	-5.0715	-5.0769

TAB. 1.5 – Résultats de l'échantillon "Avant l'évènement de conformité"

*** indique un seuil de significativité à 1%, ** à 5% et * à 10%. Ecart-type entre parenthèses. Les valeurs reportées pour la F-stat sont les p-values.

”Après l'évènement de conformité”				
	France		Pologne	
	(7)	(8)	(9)	(10)
<i>Constant</i>	-0.0165*** (0.0058)	-0.0179*** (0.0052)	-0.0165*** (0.0058)	-0.0179*** (0.0052)
$r_t^f p_t$	0.5270*** (0.1605)	0.5166*** (0.1509)	0.5271*** (0.1605)	0.5166*** (0.1509)
$(r_t^m - r_t^f) p_t$	-0.0382 (0.0317)	-0.0517* (0.0303)	-0.0382 (0.0317)	-0.0517* (0.0303)
P_{tmin}	-	-	-	-
P_{tmax}	0.0196** (0.0092)	0.0205*** (0.0078)	0.0196** (0.0092)	0.0205*** (0.0078)
<i>Spot/dec07pr</i>	0.0759** (0.0399)	0.0733** (0.0383)	0.0759** (0.0399)	0.0733** (0.0383)
<i>Spot/dec08pr</i>	-	-	-	-
<i>Banfrsub</i>	-	-	-	-
<i>Banfradd</i>	-	-	-	-
<i>Banfrdec</i>	0.1276*** (0.0486)	0.0946*** (0.0360)	-	-
<i>Banplsub</i>	-	-	-	-
<i>Banpladd</i>	-	-	-	-
<i>Banpldec</i>	-	-	0.1276*** (0.0486)	0.0946*** (0.0360)
<i>Ngas</i>	-	-	-	-
<i>Brent</i>	-	-	-	-
<i>Win07</i>	-	-0.0069* (0.0040)	-	-0.0070* (0.0040)
<i>R - squ.</i>	0.0764	0.0901	0.0764	0.0901
<i>Adj.R - squ.</i>	0.0481	0.0596	0.0481	0.0596
<i>F - Stat</i>	0.0024	0.0000	0.0000	0.0000
<i>D.W.</i>	1.9824	1.9850	1.9825	1.9850
<i>LM test</i>	0.9832	0.8836	0.9832	0.8836
<i>White test</i>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<i>AIC</i>	-1.9636	-1.9731	-1.9636	-1.9731
<i>SC</i>	-1.8370	-1.8359	-1.8370	-1.8359

TAB. 1.6 – Résultats de l'échantillon ”Après l'évènement de conformité”

*** indique un seuil de significativité à 1%, ** à 5% et * à 10%. Ecart-type entre parenthèses. Les valeurs reportées pour la F-stat sont les p-values.

Régression	Intervalle de Confiance
<i>Echantillon complet</i>	
Régression (1)	[-0.153 ;0.051]
Régression (2)	[-0.113 ;0.099]
Régression (3)	[-0.149 ;0.051]
Régression (4)	[-0.170 ;0.039]
<i>"Avant l'évènement de conformité"</i>	
Régression (5)	[-0.035 ;0.006]
Régression (6)	[-0.039 ;0.008]
<i>"Après l'évènement de conformité"</i>	
Régression (7)	[0.188 ;0.865]
Régression (8)	[0.198 ;0.835]
Régression (9)	[0.188 ;0.865]
Régression (10)	[0.198 ;0.835]

TAB. 1.7 – Intervalles de confiance pour le test de la règle de Hotelling*

*L'hypothèse nulle du test de la règle de Hotelling est $\beta_1 = 1$. D'après les coefficients estimés dans les Tableaux 1.1 à 1.3, les intervalles de confiance sont calculées d'après la formule $CI = [\hat{\beta} \pm 2.11 * Std.error]$.

	Mean	Median	Max.	Min.	SE	Skew.	Kurt.	N
<i>Echantillon complet</i>								
p_t	-0.010	0.000	0.511	-0.511	0.078	-0.302	12.231	635
spot/dec07 pr	-0.001	0.017	3.916	-3.693	0.373	1.672	57.814	635
spot/dec08 pr	-0.009	0.008	3.627	-7.813	0.595	-3.345	55.391	635
dec07/dec08 pr	0.001	-0.005	2.271	-2.599	0.427	-0.200	8.883	635
pr								
brent	-0.008	0.007	3.585	-3.135	0.887	0.025	3.095	635
ngas	-0.007	-0.103	11.589	-	1.536	0.987	16.265	635
				10.592				
<i>"Avant l'évènement de conformité"</i>								
p_t	0.001	0.001	0.085	-0.134	0.025	-1.022	8.652	208
spot/dec06 pr	-0.032	-0.081	3.901	-1.534	0.447	3.970	34.214	208
spot/dec07 pr	0.015	-0.033	3.916	-2.349	0.483	2.365	25.544	208
spot/dec08 pr	0.013	0.041	3.627	-3.941	0.597	-0.331	17.619	208
dec06/dec07 pr	-0.001	-0.003	0.317	-0.346	0.077	-0.074	7.904	208
pr								
dec07/dec08 pr	0.009	-0.021	1.613	-1.351	0.351	0.660	6.807	208
pr								
brent	0.077	0.049	3.585	-2.212	0.906	0.215	3.292	208
ngas	0.056	-0.153	11.589	-	1.953	0.993	14.231	208
				10.592				
<i>"Après l'évènement de conformité"</i>								
p_t	-0.015	0.000	0.511	-0.511	0.090	0.045	9.277	384
spot/dec07 pr	0.005	0.026	0.332	-0.451	0.085	-1.305	6.962	384
spot/dec08 pr	-0.013	-0.010	1.900	-1.833	0.400	-0.097	5.308	384
dec07/dec08 pr	0.003	-0.001	2.004	-1.784	0.395	0.029	5.635	384
pr								
brent	-0.047	-0.025	2.772	-3.135	0.869	-0.086	3.042	384
ngas	-0.033	-0.096	7.136	-6.940	1.319	0.701	11.971	384

TAB. 1.8 – Statistiques descriptives

avec p_t la série de prix spot du CO₂ prise en différence première logarithmique, tous les prix des énergies transformés en erreurs de prévision. *spot/dec06pr* est la prime entre le prix spot et le contrat futures de maturité Décembre 2006, *spot/dec07pr* la prime entre le prix spot et le contrat futures de maturité Décembre 2007, *spot/dec08pr* la prime entre le prix spot et le contrat futures de maturité Décembre 2008, *dec06/dec07pr* la prime entre les contrat futures de maturité Décembre 2006 et Décembre 2007, et *dec07/dec08pr* la prime entre les contrat futures de maturité Décembre 2006 et Décembre 2007. *SE* est l'écart-type, *Skew.* le coefficient de dissymétrie, *Kurt.* le coefficient d'aplatissement, et *N* le nombre d'observations.

Chapitre 2

Les fondamentaux du prix du CO₂

Introduction

Ce Chapitre vise à identifier les fondamentaux du prix des quotas de CO₂ échangés quotidiennement depuis 2005 dans l'EU ETS, et se compose de trois sections. Dans la première section, la présence de deux changements structurels dans les séries temporelles, en avril 2006 suivant l'annonce des émissions vérifiées pour l'année de conformité 2005, et en Octobre 2006 suivant l'annonce par la Commission Européenne d'une allocation plus restrictive en Phase II, nous permet d'isoler des fondamentaux distincts évoluant selon la période considérée. Comparés à la littérature précédente, nos résultats montrent que les prix spots du CO₂ réagissent non seulement aux erreurs de prévisions sur les prix des marchés de l'énergie, mais aussi à des événements extrêmes de températures non-anticipés. De plus, la décomposition en sous-périodes durant la Phase I de l'EU ETS nous permet d'affiner notre analyse concernant les événements institutionnels et de marché qui conduisent aux changements observés dans les prix du CO₂. La deuxième section examine les impacts de la production industrielle dans les secteurs couverts par l'EU ETS sur les prix changements du prix du CO₂ sur la période 2005-2007. A partir d'indices de production sectorielle et de la position de conformité des agents, nous montrons que les effets de l'activité industrielle sur les changements de prix du CO₂ doivent être analysés en conjonction avec des pics de production et la position

nette courte/longue du secteur¹. Ces résultats étendent la littérature précédente en montrant que les changements de prix du CO₂ ne réagissent pas uniquement aux erreurs de prévisions sur les prix des énergies et aux évènements climatiques extrêmes, mais également à la variation de la production industrielle dans trois secteurs couverts par l'EU ETS : ceux de la combustion, de la production de fer et d'acier, et de la production de pulpe et de papier. La troisième section étend l'analyse précédente au niveau EU 27 à une analyse par pays. Cette étude révèle des effets statistiquement significatifs de la variation de la production industrielle sur les changements de prix du CO₂ pour l'Allemagne, la Pologne, l'Espagne et le Royaume-Uni dans les secteurs de la combustion et de la production de fer et d'acier, et confirme le rôle central joué par les producteurs électriques allemands dans l'EU ETS.

2.1 Fondamentaux et changements de structure du prix du CO₂ liés aux décisions institutionnelles, aux prix des énergies et aux évènements climatiques sur la période 2005-2007

Depuis le 1er janvier 2005, chaque tonne de carbone émise dans l'atmosphère en Europe par environ 10600 installations intensives en énergie a un prix. L'EU ETS couvre en effet 46% des émissions de CO₂ provenant des industries en Europe, et vise à aider les Etats-Membres à atteindre la conformité avec leurs engagements pris dans le cadre du Protocole de Kyoto durant 2008-2012. Tandis que le système international d'échange de quotas autorise l'échange entre gouvernements à partir de 2008, l'EU ETS étend l'échange de quotas au niveau de la firme. Son principal objectif consiste à donner des incitations aux industriels à réduire leurs émissions de CO₂, et donc contribuer à la promotion de technologies faiblement intensives en carbone et énergie efficaces. Une gestion de la position de conformité entre

¹Une installation est définie comme courte (longue) si elle enregistre un déficit (surplus) de quotas alloués comparativement aux émissions vérifiées.

l'allocation et les émissions vérifiées s'impose donc de façon annuelle pour les installations concernées par l'EU ETS², dont les plus importantes se trouvent dans le secteur électrique. Durant la Phase I, qui s'est terminée le 31 décembre 2007, la Commission Européenne a cherché à inclure dans les prises de décision des industriels un prix du quota de CO₂ conduisant à des réductions effectives d'abattement.

Cependant, l'annonce au mois d'avril 2006 des émissions vérifiées révélant la position nette courte/longue de chaque installation durant l'année de conformité 2005 s'est accompagnée d'une chute soudaine des prix. Ensuite, d'Octobre 2006 à la fin de l'année 2007, le prix du CO₂ a tendu vers zéro suivant l'annonce par la Commission Européenne de plans d'allocations plus restrictifs en Phase II, et l'interdiction du transfert de quotas inter-périodes que nous avons étudié dans le Chapitre 1. Cette évolution du prix, représenté dans la Figure 2.1, suggère qu'avant la révélation d'informations institutionnelles l'échange de quotas était basé sur des anticipations hétérogènes, voire spéculatives. Durant 2005-2007, différents fondamentaux semblent co-exister *avant* et *après* des périodes de changements structurels. Le premier évènement de conformité 2005 a mis en évidence que quand le plafond de quotas n'est pas fixé *en-deçà* du niveau de production courante des industriels, l'échange de quotas ne garantit pas un prix suffisamment élevé pour inciter à la réduction des émissions de CO₂. Durant la Phase I, la rareté des quotas n'a pas été perçue de façon suffisamment forte par les opérateurs de marché, et le prix s'est effondré. La compréhension des mécanismes de formation des prix sur ce type de marché revêt donc une importance critique, ce qui nous amène à la question centrale suivante : quels facteurs contribuent à déterminer le prix des quotas de CO₂ récemment créés ?

Cette première section analyse l'EU ETS durant la Phase I (2005-2007) en se

²Concernant le processus de décision des entreprises, notons que les industries mesurent leurs émissions en continu. Elles connaissent leur position de conformité, et prennent leur décisions d'achat/vente de quotas en temps réel. Cependant, étant donné les mécanismes de fonctionnement institutionnel en place, ce comportement ne peut être capturé empiriquement que lors de l'évènement annuel de conformité imposé par la Commission Européenne, qui fournit une "photo" du marché à un moment précis dans le temps.

concentrant sur les relations empiriques entre les changements de prix du CO₂³ et ses principaux déterminants. La revue des modèles théoriques par Springer (2003) et Kanen (2006) nous conduit à l'identification des principaux fondamentaux du prix du CO₂ comme étant les décisions institutionnelles, les prix de l'énergie, les événements climatiques et l'activité économique. Tandis que l'offre de quotas est fixée par chaque Etat-Membre à travers les Plans Nationaux d'Allocation de Quotas (PNAQs)⁴, la demande de quota est fonction du niveau des émissions de CO₂ qui dépendent d'un certain nombre de facteurs tels que les prix du fuel (pétrole, charbon, gas naturel) et de l'électricité⁵, et les conditions climatiques (températures, précipitations, éolien). Ces aspects potentiels sont analysés dans cette première section. De plus, il n'existe pas à notre connaissance d'étude empirique s'intéressant aux effets de l'arrivée de nouvelles informations sur ce marché récemment créé. Dès les premières ébauches de PNAQs, des sentiments de sur-allocation ont émergé concernant la Phase I. Les opérateurs de marché et la littérature académique s'accordent sur la principale raison derrière la chute du prix du CO₂ de plus de 50% qui a eu lieu au mois d'avril 2006 : la révélation simultanée par plusieurs pays⁶ d'émissions vérifiées *plus faibles* que celles qui étaient anticipées durant 2005.

Par rapport à la littérature existante, notre contribution peut se résumer en trois points. Premièrement, nous identifions statistiquement deux changements structurels en avril 2006 et Octobre 2006⁷ suivant la révélation de nouvelles infor-

³Les changements de prix du CO₂ sont définis comme la série temporelle du prix du CO₂ prise en différence première logarithmique, c'est à dire $p_t = \ln(P_t/P_{t-1})$, avec P_t le prix spot du quota à la date t .

⁴Les PNAQs définissent la quantité totale de quotas alloués aux installations par les Etats-Membres.

⁵Le prix de l'électricité constitue un déterminant important du prix du CO₂, étant donné le poids des allocations au secteur électrique et les arbitrages des producteurs en matière de mix énergétique prenant en compte le coût du CO₂. De plus, le test de causalité de Granger ne permet pas de conclure qu'il existe un biais potentiel dans l'inclusion du prix de l'électricité en tant que variable explicative des changements de prix du CO₂.

⁶Tout d'abord, la région wallonne de Belgique, la France et l'Espagne, puis les Pays-Bas et la République Tchèque.

⁷Nous montrons en effet l'existence d'un second changement structurel dans la série temporelle

mations concernant la politique environnementale de la Commission Européenne. Deuxièmement, cette section apporte une extension aux travaux de Mansanet-Bataller et al. (2007), parmi d'autres contributions, en montrant que les changements du prix du CO₂ sont fonction non seulement des erreurs de prévision concernant les prix de l'énergie, mais également des changements de températures non anticipés durant des événements climatiques plus froids que la moyenne décennale. Troisièmement, cette section montre que ces fondamentaux varient en fonction des sous-périodes délimitées par les deux changements structurels, et que les changements du prix spot du CO₂ réagissent aux variables énergétiques et climatiques durant certaines sous-périodes, tandis que durant d'autres sous-périodes les décisions institutionnelles semblent avoir plus d'importance que les fondamentaux attendus. Cette évidence empirique nous conduit à la conclusion que le prix du quota répond à des fondamentaux distincts à l'intérieur de la Phase I.

La première section de ce Chapitre est organisée comme suit. La sous-section 2.1.1 rappelle les principaux fondamentaux du prix du quota. La sous-section 2.1.2 estime la relation empirique entre d'une part les changements du prix spot quotidien du CO₂, et d'autre part les marchés de l'énergie, les facteurs météorologiques et les décisions institutionnelles. La sous-section 2.1.3 présente les résultats.

2.1.1 Les principaux fondamentaux du prix du CO₂

Les nouveaux marchés de matières premières ont généralement besoin de temps pour consolider les mécanismes de formation des prix. Comme l'indique la Figure 2.1, le prix du CO₂ a été caractérisé par de fortes variations durant les deux premières années. Commencant à 8 € le 1er janvier 2005, le prix a augmenté jusqu'à 30 € au mois de juillet 2005, puis a fluctué dans la fourchette de 20-25 € durant les six mois suivants pour ensuite augmenter à nouveau à 30 € à la fin du mois d'avril. Lors de la dernière semaine d'avril 2006, le prix s'est effondré lorsque les opérateurs de marché ont annoncé leurs émissions vérifiées durant l'année de conformité 2005, et donc réalisé que l'EU ETS était dans une situation de sur-allocation. Suite à ce

du prix spot du CO₂ le 26 Octobre 2006 suite à l'annonce par la Commission Européenne de critères de validation pour les PNAQs II plus stricts.

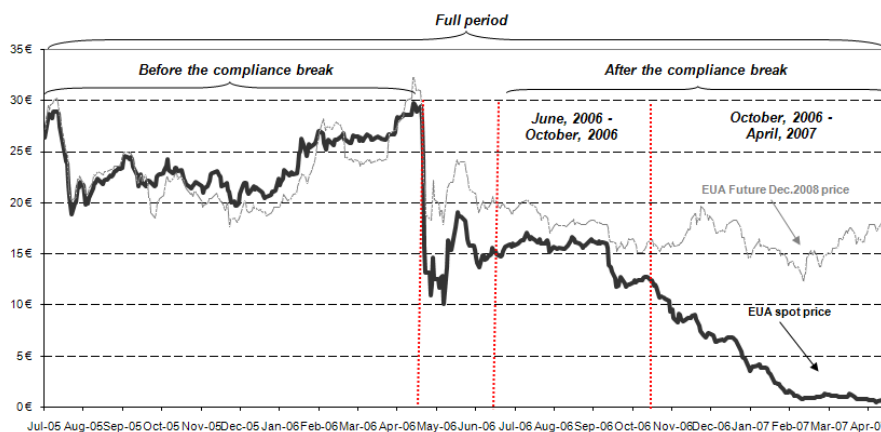


FIG. 2.1 – Evolution du prix du CO₂ entre le 1er juillet 2005 et le 30 avril 2007 d'après Bluenext

considérable ajustement de prix de -54% en quatre jours, le prix a oscillé dans la fourchette de 15-20-€ jusqu'au mois d'Octobre 2006. A partir de cette date, l'EU ETS est caractérisé par deux dynamiques de prix distinctes : le prix de la Phase I a asymptotiquement décliné vers zéro⁸, tandis que le prix de la Phase II s'est stabilisé aux alentours de 20-€ en réaction à la volonté de la Commission de rendre plus restrictifs les quotas d'allocation de la Phase II. Au mois d'avril 2007, les émissions vérifiées ont été enregistrées à nouveau *en-dessous* de l'allocation durant l'année de conformité 2006. Le prix spot du CO₂ a répondu à cette nouvelle information en déclinant vers zéro. Tandis que les futures et le prix spot de Phase I sont fortement corrélés, les futures avec une délivrance en Phase II et le prix spot sont totalement déconnectés à partir d'Octobre 2006⁹.

D'après la littérature existante, les prix des énergies sont les principaux fondamentaux du prix du CO₂ étant donné la capacité des producteurs d'électricité

⁸Se référer au développement sur la restriction du banking inter-périodes dans le Chapitre 1.

⁹Se référer à l'analyse développée dans le Chapitre 1 pour plus de détails.

à modifier leur mix énergétique de production (Kanen (2006), Christiansen et al. (2005), Bunn et Fezzi (2007)). Cette option de basculer du gaz naturel au charbon dans leur mix de production représente une opportunité de réduction des émissions de CO₂ dans le court terme. Des prix élevés (bas) de l'énergie contribuent à une croissance (décroissance) du prix du quota. Cette logique est décrite par Kanen (2006) qui identifie le prix du Brent comme étant le principal fondamental du prix du gaz naturel, qui ensuite impacte le prix de l'électricité et finalement le prix du CO₂. Les opérateurs dans le secteur électrique arbitrent également en fonction des marges brutes d'exploitation de chaque type de centrale, calculées comme la différence entre le prix de vente de l'électricité et le prix du combustible utilisé pour sa production et aussi appelées "dark" et "spark" spreads, ainsi qu'à la différence entre ces deux spreads. Le "dark spread" représente le profit théorique qu'une installation fonctionnant au charbon fait en vendant une unité d'électricité après avoir acheté le combustible nécessaire pour produire cette unité d'électricité. Le "spark spread" représente le mécanisme équivalent pour une installation fonctionnant au gaz naturel. Avec l'introduction des coûts liés au CO₂, les dark et spark spreads sont corrigés du prix du quota, et deviennent des "clean dark" et "clean spark" spreads¹⁰. L'équilibre entre ces spreads représente le prix du carbone *au-dessus* duquel il devient profitable pour un producteur d'électricité de basculer du charbon au gaz naturel, et *en-dessous* duquel il devient profitable de basculer du gaz naturel au charbon. Tant que le prix de marché du CO₂ se trouve sous le prix fictif de bascule, les installations fonctionnant au charbon sont plus profitables que celles fonctionnant au gaz naturel, même en prenant en compte le coût du CO₂. Ce prix fictif de bascule est plus sensible aux changements de prix du gaz naturel qu'à ceux du prix du charbon (Kanen (2006)). Ces trois indicateurs de profitabilité sont utilisés pour déterminer le combustible préféré lors la production d'électricité.

En influençant la demande d'énergie, les conditions climatiques ont également un effet sur le prix du CO₂. A notre connaissance, seuls Mansanet-Batallet et al. (2007) ont étudié l'impact des variables climatiques sur les changements de prix

¹⁰Calculés par la Caisse des Dépôts–Mission Climat pour Tendances Carbone. La méthodologie est disponible à l'adresse <http://www.caissedesdepots.fr/spip.php?article659>.

du CO₂. De nombreuses études ont cependant mis en évidence l'effet du climat sur les prix de l'énergie¹¹. Ces études indiquent une relation non-linéaire entre les températures et la demande d'électricité. En effet, seules les augmentations et baisses de températures, au-delà de certains seuils, sont susceptibles d'affecter la demande d'électricité¹². Par rapport à la moyenne saisonnière, des étés plus chauds augmentent la demande de climatisation, puis de production d'électricité et *in fine* la demande de charbon. Des hivers plus froids augmentent la demande de combustible de chauffage et de gaz naturel. Sous l'effet de l'augmentation (baisse) de leur niveau de production, les opérateurs électriques augmentent (diminuent) leurs émissions de CO₂, ce qui en retour augmente (diminue) leur demande de quotas.

Certains facteurs semblent néanmoins absents parmi cette revue de littérature des études empiriques récentes sur les fondamentaux du prix du CO₂. Les décisions institutionnelles concernant la restriction globale du plafond d'émissions, qui est fonction de l'allocation initiale, est susceptible d'avoir un effet sur la formation du prix du CO₂. Comme expliqué précédemment, l'écart entre l'allocation initiale de quotas aux industriels et leur niveau de production courante est apparu problématique. En avril 2006, les premières annonces par certains Etats-Membres révélant leur position nette *longue* a entraîné une forte chute du prix du CO₂. En Octobre 2006, les annonces de la Commission Européenne de critères de validation plus stricts pour les PNAQs II ont renforcé la tendance à la baisse des prix. La sous-section 2.1.2 détaille comment capturer ces fondamentaux potentiels dans notre modèle.

2.1.2 Base de données et spécification économétrique

Les données communes aux Chapitres 1 et 2 relatives au prix du CO₂, aux prix des énergies et aux événements climatiques sont présentées dans le Chapitre introductif. Nous détaillons ci-dessous les tests de changements structurels appliqués pour identifier les sous-périodes durant lesquelles les fondamentaux

¹¹Pour une revue de littérature, voir Li et Sailor (1995) et Springer (2003).

¹²Sur ce point, voir aussi Bessec et Fouquau (2008).

des prix du CO₂ semblent évoluer. Ensuite, nous introduisons notre spécification économétrique.

Changements structurels

Comme expliqué plus haut, le changement structurel dans la série de prix du CO₂ a eu lieu en avril 2006 suivant le rapport des émissions vérifiées correspondant à l'année de conformité 2005. Au mois d'avril, les premières déclarations par les Pays-Bas, la République Tchèque, la France et l'Espagne révélant leur position nette longue a entraîné cette forte chute des prix. Le 15 mai 2006, la Commission Européenne a confirmé que les émissions vérifiées étaient de l'ordre de 80 millions de tonnes ou 4% plus faibles que l'allocation 2005 (Ellerman et Buchner (2007)). Nous divisons notre base de données en deux sous-échantillons de façon à éliminer l'influence de cette période de changements de prix extrêmes.

Premièrement, nous appliquons le test de racine unitaire¹³ avec deux changements de structure endogènes de Lee et Strazicich (2003) sur la série de prix du CO₂ calculée en différence première logarithmique. Cette procédure indique que le choc lié à l'évènement de conformité s'étend du 25 avril au 23 juin 2006. Cette période est exclue de nos régressions, sauf pour l'échantillon complet¹⁴. Nous identifions deux périodes principales dans notre base de données : *avant* et *après* le choc lié à l'évènement de conformité.

Deuxièmement, nous avons utilisé le test de racine unitaire¹⁵ avec 1 seul changement de structure de Lee et Strazicich (2001). Celui-ci prouve statistiquement l'ajustement du prix du CO₂ suivant l'annonce par la Commission Européenne de critères de validation des PNAQs II plus restrictifs en Octobre 2006¹⁶. C'est

¹³Les codes GAUSS sont disponibles à l'adresse suivante : <http://www.cba.ua.edu/jlee/gauss/>.

¹⁴Car, même en présence du changement structurel, la série de prix du CO₂ en log différence première conserve une racine unitaire.

¹⁵Le modèle estime une date de changement de structure dans la moyenne de la série temporelle le 26 Octobre 2006.

¹⁶Le Commissaire Européen à l'Environnement, Stavros Dimas, a en effet déclaré le 23 Octobre 2006 que "selon les calculs de la Commission Européenne, les 17 premiers PNAQs II soumis par les Etats Membres contiennent un plafond d'émissions plus élevé que les émissions courantes de l'ordre de 15% par rapport à l'année précédente. J'ai déclaré de façon répétée que la Commission

pourquoi nous identifions deux sous-périodes dans la période *après* l'évènement de conformité : "juin 2006-Octobre 2006" et "Octobre 2006-avril 2007".

Cette analyse statistique a conduit à l'identification d'un premier changement de structure en avril 2006, tel que les observateurs de marché l'avaient relevé, et apporte des raffinements dans la caractérisation de l'évolution de la série temporelle du prix du CO₂ avec l'identification d'un second changement de structure en Octobre 2006. Ces chocs sont introduits dans nos régressions en utilisant des variables dummy. $break_1$ est la dummy caractéristique de la période d'ajustement du prix du CO₂ d'avril 2006, et $break_2$ est la dummy caractérisant la période d'ajustement de prix du CO₂ d'Octobre 2006¹⁷. Cette division entre d'une part l'échantillon complet, et d'autre part des sous -échantillons est représentée dans la Figure 2.1.

Spécification économétrique entre le prix du CO₂, les prix des énergies et les variables de températures

Le rôle joué par les variables de l'énergie sur les changements de prix du CO₂ est estimé en utilisant les erreurs de prévision sur les prix des énergies. Suivant la discussion développée plus haut, deux spécifications sont introduites pour estimer l'influence des températures sur les changements de prix du CO₂ : les variables de températures extrêmes, et les déviations des températures par rapport à la moyenne saisonnière.

Première spécification avec les variables des prix de l'énergie et de températures extrêmes

La première spécification (eq.(2.1)) résume la méthodologie suivie par Mansanet-Bataller et al. (2007) incluant les variables dummy de températures extrêmes avec

serait dure mais juste dans l'évaluation des PNAQs. Il est clair que nous devrions l'être." [EC SPEECH/06/624] disponible à

<http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=SPEECH/06/624&format=HTML&aged=1&language=EN&guiLanguage=en>

¹⁷Notons que, même si nous encadrons convenablement les évènements institutionnels, ces résultats sont à prendre avec une certaine prudence compte tenu du faible nombre d'observations.

les quintiles à 5% et 95% :

$$\begin{aligned}
 p_t = & \alpha_i + \beta_i(L)p_t + \chi_i break_1 + \delta_i break_2 + \phi_i(L)brent_t + \varphi_i(L)ngas_t \\
 & + \gamma_i(L)coal_t + \eta_i(L)switch_t + \iota_i(L)elec_t + \kappa_i(L)clean\ dark_t \\
 & + \lambda_i(L)clean\ spark_t + \Theta_i Temp + \mu_i Tempext5 + \nu_i Tempext95 + \epsilon_{i,t}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

avec t l'indice temporel et $i = \{\text{échantillon complet, sous-échantillon "avant l'évènement de conformité", sous-échantillon "après l'évènement de conformité", sous-période "juin 2006 - Octobre 2006", sous-période "octobre 2006 - avril 2007"}\}$ correspondant soit à l'échantillon complet, soit à l'un des deux sous-échantillons, soit à l'une des deux sous-périodes parmi le second sous-échantillon. p_t est le prix du CO₂ pris en différence première logarithmique, $break_1$ est la dummy caractéristique de l'évènement de conformité d'avril 2006, $break_2$ est la dummy relative à la période d'octobre 2006, $brent_t$ est la série de prix du brent, $ngas_t$ la série de prix du gaz naturel, $coal_t$ la série de prix du charbon, $switch_t$ la série de prix switch, $elec_t$ la série de prix de l'électricité, $cleandark_t$ la série de prix Clean Dark, $cleanspark_t$ la série de prix Clean Spark et $\epsilon_{i,t}$ est le terme d'erreur. Tous les prix de l'énergie ont été transformés en erreurs de prévision à un pas comme expliqué précédemment. L est un opérateur de retard tel que $L X_t = X_{t-n}$ où n est un entier et $X(L)$ des polynômes de retard. Concernant les variables de températures, $Temp$ est l'index européen de températures publié par Tendances Carbone, $Tempext5$ et $Tempext95$ sont des variables dummy caractéristiques des quintiles, respectivement, à 5% et 95% calculés à partir de cet index.

Seconde spécification avec les variables de prix de l'énergie et les déviations de températures par rapport à la moyenne saisonnière

Deuxièmement, nous introduisons une spécification alternative de façon à prendre en compte les évènements de températures. Par rapport à la littérature existante, nous choisissons d'introduire les variables d'interaction sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}
p_t = & \alpha_i + \beta_i(L)p_t + \chi_i break_1 + \delta_i break_2 + \phi_i(L)brent_t + \varphi_i(L)ngas_t \\
& + \gamma_i(L)coal_t + \eta_i(L)switch_t + \nu_i(L)elec_t + \kappa_i(L)clean\ dark_t \\
& + \lambda_i(L)clean\ spark_t + o_i Jul05 + \theta_i Win06 + \vartheta_i Jul06 \\
& + \rho_i Sepoct06 + \sigma_i Win07 + \epsilon_{i,t}
\end{aligned} \tag{2.2}$$

avec *Jul05* le produit croisé de la variable dummy caractéristique de juillet 2005 et la déviation en valeur absolue de la moyenne saisonnière de l'index de températures national en Espagne ; *Win06* le produit croisé de la variable dummy caractéristique de janvier-Février 2006 et la déviation en valeur absolue de la moyenne saisonnière de l'index de températures en Europe ; *Jul06* le produit croisé de la variable dummy caractéristique de juillet 2006 et la déviation en valeur absolue de la moyenne saisonnière de l'index de températures en Europe ; *Sepoct06* le produit croisé de la variable dummy caractéristique de septembre-octobre 2006 et la déviation en valeur absolue de la moyenne saisonnière de l'index de températures en Europe ; *Win07* le produit croisé de la variable dummy caractéristique de janvier-Février 2007 et la déviation en valeur absolue de la moyenne saisonnière de l'index de températures en Europe. Les autres variables sont expliquées dans l'eq.(2.1).

La sous-section suivante présente les estimations de ces deux spécifications. Comme indiqué plus haut, la série de prix du CO₂ est caractérisée par deux changements de structure sur la période 2005-2007 qui correspondent à des événements institutionnels, et donc doit être analysée *avant* et *après* ces chocs. Ces deux points de rupture nous conduisent à distinguer deux périodes principales dans notre analyse : "avant l'évènement de conformité 2005" et "après l'évènement de conformité 2005" (c'est à dire avant et après la variable *break*₁). A l'intérieur de la période "après l'évènement de conformité 2005", les deux sous-périodes correspondent à "juin-octobre 2006" et "octobre 2006-avril 2007" (c'est à dire avant et après la variable *break*₂).

2.1.3 Résultats et Interprétations

Les résultats de l'échantillon complet pour les eq.(2.1) et (2.2) sont tout d'abord commentés, suivis des commentaires des sous-échantillons, et des sous-périodes à l'intérieur du second sous-échantillon (voir Figure 2.1). Les statistiques descriptives sont présentées dans le Tableau 2.1.

La qualité des régressions est vérifiée à travers les tests statistiques suivants : le R^2 , le R^2 ajusté, la p-value de la statistique F-test ($F - Stat$), la statistique Durbin-Watson ($D.W$), la p-value du test Breush-Godfrey d'absence de corrélation sérielle du multiplicateur de Lagrange (LM), la p-value du test d'hétéroscédasticité de White ($White test$), le critère d'information d'Akaike (AIC) et le critère d'information de Schwarz (SC). Quand nous diagnostiquons la présence d'hétéroscédasticité par l'intermédiaire du test de White, nous avons effectué des tests de robustesse par l'intermédiaire d'un modèle GARCH(1,1). Les résultats obtenus étant qualitativement similaires¹⁸, nous commentons les coefficients estimés par les moindres carrés ordinaires en utilisant la procédure de Newey-West dans le but de simplifier la présentation des résultats.

Echantillon complet

Dans le Tableau 2.3, les régressions (1) et (2) présentent les résultats de l'eq.(2.1). La régression (2) est la forme réduite de l'eq.(2.1) car ni $Tempext5$ ni $Tempext95$ n'ont été identifiés comme significatif au seuil de 10% (régression (1)). L'examen de la fonction d'autocorrélation de la variable dépendante nous a conduit à sélectionner un retard d'ordre 2. Le R^2 ajusté et le R^2 sont compris respectivement entre 34% et 35.5% et, à en juger par la p-value du F-test, la significativité jointe de l'ensemble des coefficients est acceptée au seuil de 1%. Le LM test ne rejette pas au seuil de 5% l'hypothèse nulle d'absence d'auto-corrélation des résidus pour ce modèle.

Les variables $brent$ et $switch$ ne sont pas statistiquement significatives au seuil de 10%. Le premier résultat est conforme à Kanen (2006), qui a identifié que le

¹⁸Voir les résultats du Tableau 2.6.

prix du Brent impacte le prix du CO₂ à travers le prix du gaz naturel. Le second résultat est contre intuitif, et le fait que la variable *switch* n'affecte pas le prix du CO₂ comme le prix du charbon ou du gaz naturel peut être expliqué par un problème de multi-colinéarité.

Premièrement, parmi les variables de prix des énergies significatives, *ngas* et *clean spark* ont un impact positif sur les changements de prix du CO₂, tandis que *coal* et *clean dark* ont des coefficients négatifs. L'EU ETS a été lancé à une période de prix des énergies élevés. Le coefficient de *ngas* est positif et significatif au seuil de 1%. Des niveaux élevés de prix du gaz naturel ont conduit les opérateurs électriques à réaliser un switch dans leur utilisation de fuel du gaz naturel vers le charbon. Le prix du gaz naturel a augmenté d'octobre 2005 à avril 2006, et a positivement influencé le prix du CO₂. *Clean spark* affecte positivement le changement de prix du CO₂ au seuil de 10%. Durant 2005-2007, *clean dark* est resté au-dessus de *clean spark*, indiquant que brûler du charbon est plus profitable que du gaz naturel, ce qui accroît la demande de quotas. Au début de 2007, la différence entre les indicateurs de profitabilité *clean dark* et *clean spark* s'est amenuisée. Cette situation encourage les compagnies électriques à réduire l'utilisation de charbon en faveur du gaz naturel. Le charbon étant la variable la plus intensive en CO₂, nous trouvons un signe *négatif* sur le changement du prix du CO₂ au seuil de 5%. Quand les entreprises sont confrontées à une augmentation du prix du charbon par rapport aux autres prix des énergies, elles ont intérêt à adapter leur énergie mix en faveur de sources d'énergie *moins* intensives en CO₂, ce qui conduit à une demande *plus faible* de quotas. Le prix du CO₂ est affecté positivement par la variable *elec*. Ce résultat s'explique par le fait que, même si l'allocation au secteur électrique est supérieure à 50%, ce secteur a été le plus contraint durant les PNAQs I sur la base d'un potentiel d'abattement des émissions de CO₂ plus important que les autres secteurs. Certains opérateurs électriques sont *acheteurs nets* de quotas, ce qui impacte *positivement* les changements de prix du CO₂.

Deuxièmement, concernant les variables de changement de structure, seul le choc d'avril 2006 (*break1*) est statistiquement significatif au seuil de 10%. Le choc institutionnel suivant le premier rapport des émissions vérifiées en 2005 ap-

paraît plus important que l'annonce institutionnelle d'octobre 2006. En avril 2006, une chute brutale des prix intervient dont l'ajustement porte essentiellement sur une période quatre jours, tandis qu'après octobre 2006 une longue période de décroissance du prix du CO₂ est observée. Cette situation explique pourquoi seulement la variable *break1* est statistiquement significative dans l'échantillon complet.

Concernant les variables de températures, ni *Tempext5* ni *Tempext95* ne sont statistiquement significatives (régression (1)) comme indiqué précédemment. Ce résultat semble indiquer que nous ne capturons pas l'effet des jours extrêmement chauds ou froids sur les changements de prix du CO₂ tel qu'il a été explicité dans la littérature précédente¹⁹. Le signe négatif de *Tempext95* semble aussi contre-intuitif : lorsque le climat est extrêmement froid, l'utilisation de chauffage s'accroît, ce qui induit une augmentation de la consommation d'énergie et *in fine* une augmentation du prix du quota en conséquence de l'augmentation des émissions de CO₂ (Mansanet-Bataller et al., 2007). Les estimations de l'éq. (2.2) (régression (3)) nous apportent un premier élément d'explication. Seul *Win07* est significatif et son coefficient est *négatif*. Le coefficient de *Win06* n'est pas significatif au seuil de 10%. Par rapport à l'éq.(2.1) (régression (2)), le R² ajusté augmente de 34.17% à 35.58%, tandis que les critères AIC et SC diminuent. L'inclusion de variables de températures basées sur leur déviation par rapport à la moyenne saisonnière apparaît pertinente pour expliquer les changements de prix du CO₂. Notons que, parmi les autres variables de températures qui ne sont pas significatives au seuil de 10%, les jours extrêmement chauds ne semblent pas impacter les changements de prix du CO₂²⁰. De plus, chacune des cinq séries de températures a été incluse comme variable explicative potentielle, mais aucune d'entre elles n'est statistiquement significative. Nous avons également essayé de remplacer la variable *Win06* (*Win07*) par le produit croisé de la variable dummy caractéristique de la période

¹⁹Nous pouvons ici nous référer aux développements précédemment cités dans la littérature sur les modèles à seuil : quand il fait extrêmement froid, le fait qu'il fasse encore plus froid n'a aucun impact sur la consommation d'énergie : il existe un seuil, et si on descend sous ce seuil, cela ne change rien.

²⁰Le même raisonnement à partir de modèles à seuil s'applique ici aux jours extrêmement chauds.

janvier-Février 2006 (janvier-Février 2007) et l'index européen de températures, à la place de la déviation de l'index par rapport à la moyenne saisonnière en valeur absolue, mais sans atteindre le seuil de significativité de 10%. En combinant ces deux remarques, nous pouvons en déduire les conclusions suivantes. Premièrement, nous retrouvons les résultats de la littérature précédente en montrant la non-linéarité de la relation entre les températures et les changements de prix du CO₂. Deuxièmement, nous mettons en évidence que *les déviations par rapport à la moyenne saisonnière* ont plus d'importance que les températures elles-mêmes pour expliquer les changements de prix du CO₂ durant les événements extrêmes. Cette conclusion s'applique pour les jours extrêmement froids, mais non pour les jours extrêmement chauds.

Etant donné que le changement de structure du mois d'avril 2006 a été identifié comme étant statistiquement significatif dans l'échantillon complet, nous présentons ci-dessous les résultats obtenus dans les deux sous-échantillons.

Sous-échantillon "Avant l'évènement de conformité" (juillet 2005 - avril 2006)

Les résultats des eq.(2.1) et (2.2) sont présentés dans le Tableau 2.4 (régressions (4) et (5)). Les R² ajustés sont respectivement égaux à 10.47% et 10.72%. L'ensemble des tests de diagnostic valident ces deux estimations. *ngas*, *coal*, *clean spark* et *clean dark* ne sont pas significatifs tandis que *brent*, *elec* et *switch* sont significatifs et positifs. A la fois *brent*²¹ et *électricité* sont significatifs au seuil de 5%. Le signe de *switch* est conforme à ce qui a été expliqué dans la Section 2.1.2. Durant la première année de l'EU ETS, les agents avaient besoin de temps pour découvrir les fondamentaux du prix du CO₂. Le marché du carbone a donc été largement influencé par le marché de l'électricité qui regroupe les principaux acteurs sur ce marché. La stabilité des résultats pour les coefficients des variables de l'énergie entre les deux modèles prouve la robustesse de nos résultats. Ce commentaire s'applique dans la suite de cette section.

Par rapport à Mansanet-Bataller et al. (2007), nous mettons en évidence l'im-

²¹Cette variable est retardée d'une période car elle perd sa significativité sans retard.

pact positif de *brent* et le manque de significativité de *coal* sur les changements de prix du CO₂. Certains résultats de cette étude semblent contradictoires, notamment le coefficient statistiquement significatif et positif de *ngas* et la non-significativité de leur variable équivalente à *switch*. Etant donné que le prix du charbon est relativement stable sur la période considérée, le fait d'avoir *switch* significatif et non *ngas* transmet la même information que d'avoir seulement *ngas* significatif. Nous identifions donc les mêmes fondamentaux que Mansanet-Bataller et al. (2007) dans le sous-échantillon "avant l'évènement de conformité" correspondant à la période étudiée dans cet article²².

Par rapport aux estimations de l'échantillon complet, *Tempext95* n'est toujours pas significatif (eq.(2.1), régression (4)). Au contraire, *Tempext5* devient significatif et son signe est positif : plus le climat est *froid*, plus les effets des températures sur les changements de prix du CO₂ sont importants.

Concernant les résultats de l'eq.(2.2) (régression (5)), *Win06* devient significatif. Son signe positif est conforme à la littérature précédente concernant les effets des jours extrêmement froids.

Sous-échantillon "Après l'évènement de conformité" (juin 2006 - avril 2007)

Les résultats des eq.(2.1) et (2.2) sont présentés dans le Tableau 2.5 (respectivement régression (6) et (7)). Les R² ajustés sont égaux respectivement à 21.88% et 23.53%.

Par rapport à l'échantillon complet, *ngas* et *coal* deviennent statistiquement non-significatifs, tandis que *switch* devient significatif et positif. Les fondamentaux liés aux prix de l'énergie sont similaires entre ces deux périodes puisque *switch* peut être interprété comme le prix fictif d'équilibre entre le gaz naturel et le charbon. De plus, *elec*, *clean spark* et *clean dark* restent significatifs avec le même signe et *brent* devient un fondamental avec un signe positif sur les changements de prix du CO₂.

Par rapport à la période "avant l'évènement de conformité", nous identifions

²²La période d'étude de cet article est : 1er janvier 2005 - 30 novembre 2005.

”après l’évènement de conformité” plus de fondamentaux des changements de prix du CO₂. La publication des émissions vérifiées durant l’année 2005 a créé un changement de comportement parmi les acteurs de marché étant donné qu’ils n’avaient pas d’indication précise et fiable de leurs position de conformité nette courte/longue depuis la création de l’EU ETS. Comme expliqué dans la Section 2.1.3, la variable dummy *break2* est ré-introduite pour vérifier la présence d’un second changement de structure le 26 octobre 2006 à l’intérieur du sous-échantillon ”après l’évènement de conformité”. Cette variable dummy est significative et négative dans l’eq.(2.1) (régression (6)). Le fait de perdre la significativité de la dummy de changement de structure (*break2*) dans l’eq.(2.2) (régression (7))²³ suggère que la variable *Win07* contribue à une meilleure explication des changements de prix du CO₂.

Dans l’eq.(2.1), seule la variable *Tempept5* est significative et son signe est négatif (régression (6)). L’eq.(2.2) indique que seule la variable *Win07* est significative et son signe est aussi négatif (régression (7)). La comparaison des résultats de l’eq.(2.1) entre les périodes ”avant/après l’évènement de conformité” pourrait conduire à la conclusion selon laquelle le signe des évènements extrêmement froids n’est pas robuste. En fait, l’analyse des estimations de l’eq.(2.2) durant ces deux périodes explique le changement de signe de *Tempept5*. Le quintile à 5% de l’indice européen de températures (*Tempept5*) correspond pour la plupart aux mois de janvier-Février 2006 durant la période ”avant l’évènement de conformité”, et aux mois de janvier-Février 2007 durant la période ”après l’évènement de conformité”. Comme expliqué plus haut, l’hiver 2006 était un hiver très froid tandis que l’hiver 2007 était un hiver plus chaud que la moyenne saisonnière en Europe. Les deux variables d’interaction *Win06* et *Win07* sont significatives durant, respectivement, les périodes ”avant l’évènement de conformité” et ”après l’évènement de conformité”. Le signe de *Win06* est positif tandis que le signe de *Win07* est

²³La variable *Clean spark* perd sa significativité au seuil de 11%. Nous décidons cependant de conserver cette variable car le fait de retirer *clean spark* ne change pas les signes et la significativité des autres variables dans la régression (7), et nous souhaitons comparer les résultats de la régression (7) avec ceux de la régression (6). Le même commentaire s’applique pour la régression (10).

négalif. Ces résultats indiquent que les jours extrêmement froids ont un effet sur les changements de prix du CO₂. Le signe de cet impact dépend de la déviation des températures par rapport à la moyenne saisonnière, et non des températures elles-mêmes. Quand les événements extrêmement froids sont plus froids (chauds) que la moyenne saisonnière, les producteurs d'électricité doivent produire plus (moins) que le niveau initialement prévu, ce qui conduit à augmenter (diminuer) la demande de quotas et a finalement un effet positif (négalif) sur les changements de prix du CO₂. Cette analyse révèle que les variations non-anticipées de températures ont plus d'importance que les températures elles-mêmes durant les événements climatiques extrêmement froids pour expliquer les changements de prix du CO₂. Etant donné que le changement de structure d'octobre 2006 est statistiquement significatif, nous conduisons ci-dessous une analyse par sous-périodes à l'intérieur du second sous-échantillon.

Sous-période "juin 2006 - octobre 2006"

Les prix du CO₂ semblent déconnectés de tout fondamental durant cette sous-période spécifique. Les résultats des eq.(2.1) et (2.2) - présentés dans le Tableau 2.5 (régression (8)) car aucune spécification avec des variables de températures n'est statistiquement significative - mettent en évidence le comportement d'attente des acteurs de marché étant donné qu'aucun prix de l'énergie, à part le *brent*, n'influence les changements de prix du CO₂. Les agents intègrent dans leurs anticipations la position globalement nette *longue* du marché. De plus, les agents anticipent des critères de validation des PNAQs II plus restrictifs par la Commission Européenne. Les agents apparaissent donc sensibles à la diffusion de toute nouvelle information institutionnelle.

Sous-période "octobre 2006 - avril 2007"

Les résultats des eq.(2.1) et eq.(2.2) sont présentés dans le Tableau 2.5 (respectivement régressions (9) et (10)). Après le premier événement de conformité et l'annonce de critères de validation plus stricts pour les PNAQs II, les changements de prix du CO₂ répondent aux mêmes variables de l'énergie que durant le sous-échantillon "après l'évènement de conformité" (régressions (6) et (7)) dans un

contexte de diminution des prix du fuel. Cette situation reflète un ajustement avec retard du prix du CO₂ au pic du prix du pétrole tel que décrit par les spécialistes de ce marché. Comme durant la période "après l'évènement de conformité", les résultats d'estimation indiquent que seuls les évènements extrêmement froids ont un effet statistiquement significatif et négatif sur les changements de prix du CO₂. Le signe négatif de *Win07* suggère que ce ne sont pas les températures elles-mêmes, mais les changements de températures non-anticipés qui ont un effet sur les changements de prix du CO₂ durant les évènements climatiques extrêmes.

Les trois résultats principaux de cette première section peuvent se résumer comme suit. Nous généralisons tout d'abord à notre échantillon allant du 1er juillet 2005 au 30 avril 2007 l'ensemble des fondamentaux du prix du CO₂ liés aux prix de l'énergie mis en évidence par Mansanet-Bataller et al. (2007). Deuxièmement, notre résultat principal indique que ces fondamentaux varient sur la période 2005-2007 selon deux changements de structure et deux sous-périodes statistiquement identifiés en fonction de l'arrivée de nouvelles informations. Le premier changement de structure, identifié au mois d'avril 2006 suivant l'annonce des émissions vérifiées pour l'année de conformité 2005, souligne que les changements de prix du CO₂ réagissent à des fondamentaux liés à la révélation d'information institutionnelle. Ce résultat suggère qu'avant l'évènement de conformité au mois d'avril 2006, les échanges de quotas étaient basés sur des anticipations hétérogènes puisque le prix du CO₂ réagit à certains, mais pas tous, des mécanismes qui ont été mis en évidence sur l'échantillon complet. La présence d'un second changement de structure au mois d'octobre 2006 suite aux annonces de la Commission Européenne concernant la restriction de l'allocation en Phase II confirme le changement de comportement des agents. Troisièmement, par rapport à la littérature existante, nous retrouvons les résultats de la littérature précédente en montrant la non-linéarité de la relation entre les températures et les changements de prix du CO₂. L'analyse concernant l'influence des températures est étendue en considérant non seulement les températures extrêmes, mais également les déviations de températures par rapport à la moyenne saisonnière. Nous montrons que les variations de températures

non-anticipées ont plus d'importance que les températures elles-mêmes pour expliquer les changements de prix du CO₂. Cette conclusion s'applique aux événements climatiques extrêmement froids, et non aux événements climatiques extrêmement chauds. Dans la deuxième section, nous examinons les effets liés à la variation de la production industrielle comme fondamental potentiel du prix du CO₂. Ces effets sont suggérés par la littérature professionnelle, mais n'ont pas fait l'objet d'une évaluation empirique.

2.2 Fondamentaux du prix du CO₂ liés aux effets de la variation de la production industrielle et aux positions de conformité

Nous concentrons à présent l'analyse sur la relation empirique entre d'une part les changements de prix du CO₂, et d'autre part la variation de la production industrielle dans les secteurs concernés par l'EU ETS. Au-delà des effets des prix des énergies, des températures et des événements institutionnels sur les changements de prix du CO₂, cette deuxième section s'attache à mettre en évidence les effets liés à l'évolution de l'activité économique, avec un intérêt particulier pour identifier économétriquement les canaux relatifs aux sphères productives et environnementales.

Le prix du CO₂ est fonction des coûts marginaux d'abattement des installations couvertes par l'EU ETS. Ceux-ci varient en fonction des options d'abattement d'émissions des industriels, et de la relation entre le plafond d'émissions²⁴ et les émissions contre-factuelles²⁵. Les changements de prix du CO₂ peuvent être affectés par l'évolution de l'activité économique²⁶ des secteurs inclus dans l'EU ETS

²⁴Rappelons qu'un plafond d'émission place une limite quantitative au nombre de tonnes de CO₂ émises dans l'atmosphère par les firmes concernées par l'EU ETS.

²⁵Les émissions contre-factuelles de CO₂ résultent de prévisions de croissance des émissions calculées à partir du niveau de production courante.

²⁶Du fait de la fréquence des données, nous capturons les effets de l'activité économique par l'intermédiaire d'indices de production mensuels au lieu du PIB. Dans la suite de cette section,

pour deux raisons principales. Premièrement, les industriels sont capables d'avoir une influence sur le prix de marché à travers le choix de leurs options d'abattement d'émissions²⁷. Deuxièmement, selon de nombreux observateurs de marché, les industriels ont adopté des stratégies de gestion des quotas en fonction de la production effective sur la période 2005-2007. A notre connaissance, aucune étude empirique n'a explicité les impacts attendus de la variation de la production industrielle dans les secteurs couverts par l'EU ETS sur les changements de prix du CO₂.

Cependant, deux courants de littérature distincts se sont développés concernant la relation entre le prix du CO₂ et la production industrielle. D'une part, la littérature sur les impacts du prix du CO₂ sur le prix des biens et le niveau de production industrielle soulève des questions concernant le niveau de *pass-through*²⁸ et la compétitivité des firmes couvertes par l'EU ETS. L'estimation du *pass-through* relie notamment le prix du CO₂ et le prix des biens vendus²⁹. Les questions de compétitivité³⁰ sont détaillées par Reinaud (2007) dans le secteur électrique, Demailly et Quirion (2008a) dans le secteur du fer et de l'acier³¹ et Demailly et

nous nous référons donc à la variation de la production industrielle.

²⁷Les industriels ont le choix entre différentes possibilités d'abattement allant de l'investissement dans des technologies réduisant les émissions en bout de chaîne, à des investissements plus lourds nécessitant de complexes changements de processus de production en vue de l'adoption de technologies plus propres. L'information sur ces coûts marginaux d'abattement est très diffuse et difficilement recouvrable au niveau des installations.

²⁸Le *pass-through* se définit comme l'effet de transmission du prix du CO₂ sur le prix des biens.

²⁹Dans le secteur électrique en Allemagne et aux Pays-Bas, Sijm et al. (2006) observent des taux de *pass-through* élevés allant de 40 à 120% des coûts liés au prix du CO₂. Dans le secteur du ciment au niveau agrégé, Walker (2006) teste la possibilité du *pass-through* mais sans résultat concluant. Dans le secteur du fer et de l'acier, Smale et al. (2006) estiment que les industriels sont capables de passer 65% de l'augmentation de leur coût marginal sur les consommateurs.

³⁰Telles que le lien entre le prix du CO₂ et les coûts de production, les parts de marché, les volumes de production, etc.

³¹Dans le secteur du fer et de l'acier, les études cherchant à quantifier les impacts du coût du CO₂ sur la compétitivité trouvent des effets limités sur le court-terme (Carbon Trust (2004,2005), Smale et al. (2006), Demailly et Quirion (2008a), McKinsey et Ecofys (2006)). Malgré une exposition au commerce international relativement plus importante que le secteur du ciment, la différenciation des produits appelle dans une certaine mesure à une différenciation des prix. Smale

Quirion (2008b)³² dans le secteur du ciment. D'autre part, la littérature sur les impacts des volumes de production industrielle sur le prix du CO₂ soulève la question de l'estimation des émissions de CO₂ au cours du processus de production industrielle, et donc de l'analyse par décomposition (Diakoulaki et al. (2007)). Dans cette section, nous étudions la relation *ex-post* entre la variation de la production industrielle, la position de conformité et les changements de prix du CO₂ pour tous les secteurs au niveau EU 27.

Comme l'ont montré Ellerman et Buchner (2008), les notions de sur-allocation et d'abattement précoce doivent être analysées au niveau de chaque installation par le rapport entre les émissions vérifiées relativement à l'allocation. Nous examinons la relation entre l'évolution de l'activité économique, mesurée par des indices de production industrielle, et les changements de prix du CO₂ en fonction de deux types de variables dummy. Premièrement, nous utilisons un indicateur de rigueur de l'allocation, défini comme le ratio entre le niveau d'allocation par rapport aux émissions de référence, pour capturer la position de conformité nette courte/longue de chaque secteur. Deuxièmement, nous identifions des pics de production, définis comme la variation de la production industrielle au-delà de certains seuils, pour estimer les effets de l'évolution de l'activité économique en conjonction avec les indices de production industrielle. De façon à décomposer pleinement les effets sur les changements de prix du CO₂, nous prenons également en compte les interactions potentielles entre chacune des variables dummy et l'indice de production industrielle de chaque secteur.

Cette deuxième section étend les résultats obtenus précédemment en mettant en évidence d'autres fondamentaux du prix du CO₂ que les prix de l'énergie, les

et al. (2006) estiment qu'avec un prix du CO₂ de 15€/tonne, le coût marginal de production augmente à court-terme de 8% et le volume de production décroît de 2.1%.

³²Demaiilly et Quirion (2008b) étudient l'impact de l'EU ETS sur l'industrie du ciment en Europe en prenant en compte les effets de la compétition étrangère et les coûts de transports. Leurs conclusions supportent l'idée selon laquelle les cimentiers ont profité de la distribution gratuite de quotas. Les auteurs adressent la tension entre l'objectif de maximisation de profit à court-terme et la perte de parts de marché à l'exportation dans le long terme. L'allocation de quotas en proportion de l'output est avancée comme une approche alternative pour traiter les questions de compétitivité.

températures et les évènements institutionnels. Nos résultats montrent un effet statistiquement significatif de trois secteurs sur les changements de prix du CO₂ : ceux de la combustion³³, de la production de fer et d'acier, et de la production de pulpe et de papier qui totalisent 80% de l'allocation dans l'EU ETS. Nous avons pu décomposer ces résultats avec des variables d'interaction uniquement dans le secteur de la combustion, qui regroupe environ 70% de l'allocation et correspond au secteur central de notre analyse empirique³⁴.

La suite de cette deuxième section est organisée comme suit. La sous-section 2.2.1 détaille la relation empirique testée entre la variation de la production industrielle dans les secteurs couverts par l'EU ETS, les plafonds d'émissions et les changements de prix du CO₂. La sous-section 2.2.2 présente la base de données et les spécifications économétriques. La sous-section 2.2.3 contient les résultats ainsi qu'une discussion.

2.2.1 Les impacts potentiels de la production industrielle et des objectifs de conformité sur les changements de prix du CO₂

Rappelons que le but de l'EU ETS consiste à fournir un signal prix approprié aux industriels pour qu'ils prennent en compte dans leurs investissements de capital productif, leurs pratiques opératoires et leurs rejets d'émissions des décisions optimales visant à minimiser les coûts d'abattement et les dépenses liées à leur

³³Le secteur de la combustion a été défini de façon différente par chaque Etat-Membre et contient de nombreuses sous-activités. Trotignon et McGuinness (2007) et Trotignon et al. (2008) distinguent les installations de production d'électricité de grande taille, les installations de génération de chauffage et les autres installations.

³⁴Rappelons que les producteurs d'électricité sont les principaux acteurs de marché sur l'EU ETS : leur activité de trading ainsi que leur potentiel d'abattement sont centraux pour atteindre de réelles réductions d'émissions de CO₂. Sans ces acteurs, l'EU ETS n'aurait quasiment pas d'impact environnemental. Nos régressions ne sont pas biaisées par l'inclusion du secteur de la combustion, étant donné que nous cherchons à détailler explicitement les effets de l'activité économique sur les changements de prix du CO₂, basé sur la part respective de chaque secteur couvert par l'EU ETS en terme d'allocation.

position de conformité sur le marché de quotas (Noll (1982)). Tandis que l'offre de quotas est fixée par chaque Etat-Membre à travers les PNAQs, la demande de quotas est fonction du niveau d'émissions des industriels participant au marché. Le prix du CO₂ est déterminé à l'équilibre par le transfert entre des installations ayant une alternance de positions de conformité nettes courtes et longues.

Dans la première section, les décisions politiques et institutionnelles concernant l'allocation et les événements de conformité ont été identifiées comme des fondamentaux des changements de prix du CO₂ sur la période 2005-2007. Dans ce qui suit, nous détaillons la façon dont la conformité avec le plafond d'émissions dépend des prévisions de la croissance de l'activité industrielle dans les secteurs couverts par l'EU ETS. Plus précisément, la situation de sur-allocation de quotas par rapport aux émissions vérifiées se doit d'être nuancée par une analyse entre les objectifs de conformité annuels fixés *ex-ante*, et la variation *ex-post* de la production industrielle.

Les industries couvertes par l'EU ETS

Nous présentons tout d'abord la classification des industries couvertes par l'EU ETS, ainsi que la variation de la production pendant 2005-2007.

Classification des industries

Durant 2005-2007, l'EU ETS concerne les installations dont les processus de production sont les plus intensifs en émissions de CO₂ parmi neuf industries, et dans 27 Etats-Membres. Les émissions diffuses provenant des transports et de l'agriculture ne sont pas incluses de façon à faciliter la mise en oeuvre du marché lors des premières Phases. La Directive 2003/87/CE liste les activités concernées par l'EU ETS : le secteur de la combustion avec un taux d'input thermique supérieur à 20 MWh, les raffineries de pétrole, les fours à coke, les usines produisant du fer et de l'acier, du ciment, du verre, de la chaud, de la brique, de la céramique, de la pulpe et du papier. Le Tableau 2.8 détaille l'ensemble de ces secteurs qui totalisent environ 10,600 installations.

Il est possible d'identifier le nombre d'installations incluses dans l'EU ETS et la

classification de leur activité grâce aux PNAQs et au CITL³⁵. Nous nous basons sur l'étude de Trotignon et McGuinness (2007) et Trotignon et al. (2008) pour effectuer une classification des installations selon leur répartition géographique et sectorielle.

Evolution de la production industrielle en 2005-2006

Depuis le lancement de l'EU ETS, l'activité économique en Europe a été relativement robuste : le PIB dans l'EU 25 a augmenté de 1.9% en 2005 et 3.0% en 2006 d'après Eurostat. La production industrielle, ajustée des variations saisonnières par Eurostat, a augmenté de 2.8% en 2005 et 4.4% en 2006. Les Figures 2.6 et 2.7 représentent l'évolution de la production industrielle mensuelle par secteur dans l'EU 27. Le Tableau 2.9 détaille les taux de croissance de la production industrielle dans les secteurs couverts par l'EU ETS durant 2005-2006. Dans la Figure 2.6, on remarque une évolution stable de l'activité, voire croissante, dans les secteurs du verre, de la céramique, et des raffineries. Les secteurs de la production de papier et des fours à coke ont connu une évolution plus heurtée avec une forte baisse d'activité au cours des deuxième et troisième trimestres de l'année 2005, puis ont connu une reprise vigoureuse jusqu'à fin 2006. Dans la Figure 2.7, on remarque que les secteurs du ciment, du fer et de l'acier, du métal ont connu une évolution strictement croissante de leur activité durant 2005-2006. Au contraire, le secteur électrique a connu une stagnation, voire une baisse d'activité au cours de l'année 2006. Nous retenons que l'évolution de la production industrielle en 2005-2006 a été contrastée selon les secteurs couverts par l'EU ETS. Par la suite, nous basons notre commentaire en fonction de l'évolution spécifique de chaque secteur identifié comme ayant un impact statistiquement significatif sur les changements de prix du CO₂.

³⁵Le CITL contient l'ensemble des informations relatives à l'allocation et aux émissions vérifiées en base annuelle, ainsi que la propriété de chaque quota et les transactions enregistrées entre les comptes industriels.

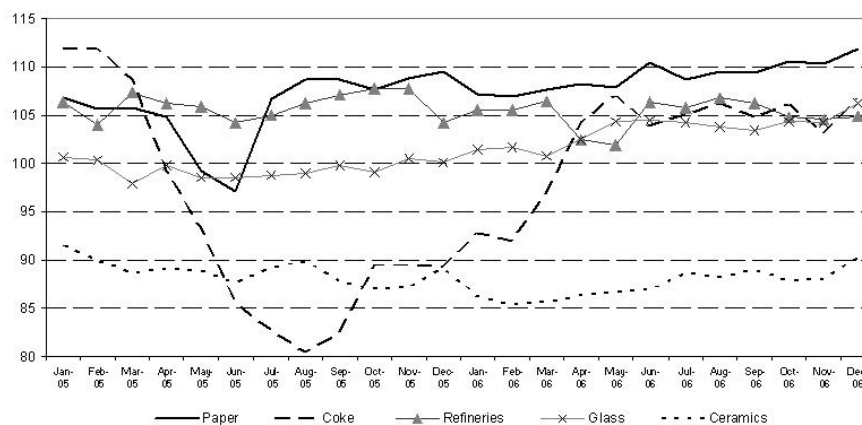


FIG. 2.2 – Evolution de la production industrielle mensuelle dans les secteurs de la production de papier, de verre, de céramique, des raffineries et des fours à coke durant 2005-2006 basée sur la classification NACE Rev.1 C-F d'après Eurostat

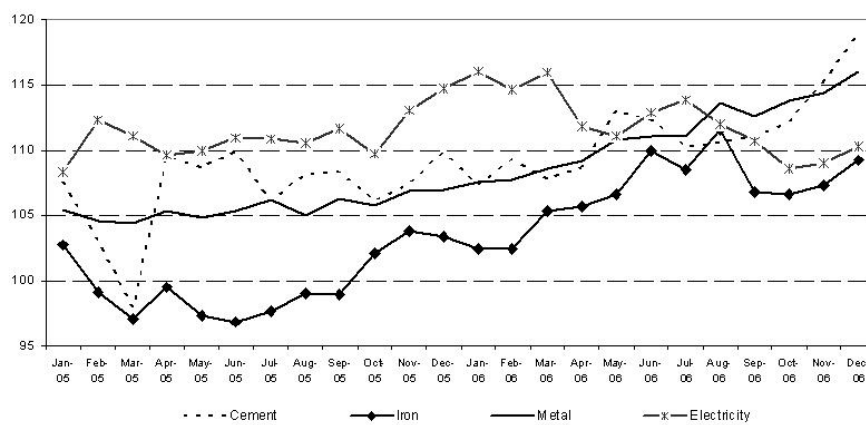


FIG. 2.3 – Evolution de la production industrielle mensuelle dans les secteurs de la production de ciment, de fer, de métal, et de la combustion durant 2005-2006 basée sur la classification NACE Rev.1 C-F d'après Eurostat

Plafond d'émissions et position de conformité dans les secteurs industriels couverts par l'EU ETS durant 2005-2006

Nous présentons ici un bref rappel des mécanismes institutionnels concernant l'allocation de quotas et le contrôle des émissions dans l'EU ETS.

PNAQs I (2005-2007)

D'après la Directive 2003/87/CE, chaque Etat-Membre doit déterminer les installations couvertes par l'EU ETS, le nombre de quotas distribués, et spécifier les réserves pour les nouveaux entrants et les fermetures d'installations³⁶. Avant le lancement de l'EU ETS le 1er janvier 2005, les PNAQs de 25 Etats-Membres³⁷ auraient dû être envoyés à la Commission Européenne pour le 31 mars 2004, qui auraient ensuite été amendés sous trois mois. A cause des lenteurs administratives conduisant à la création du marché de quotas, l'EU ETS a été lancé sans validation formelle de tous les PNAQs³⁸, dont Leseur et al. (2007) et Ellerman et al. (2008) fournissent une analyse détaillée.

Les Etats-Membres ont alloué les quotas selon les consignes de la Commission Européenne³⁹. Ce processus s'est déroulé en trois étapes :

1. Au niveau *macro* : la décision la plus importante concerne le nombre total de quotas devant être distribués, c'est à dire la définition du plafond d'émission. La somme des 25 PNAQs conditionne la rareté des quotas et la performance environnementale de l'ensemble du marché. Chaque Etat-Membre décide du nombre de quotas distribués en fonction de leurs responsabilités différenciées au sein de l'Union Européenne et de la validation par la Commission.
2. Au niveau *sectoriel* : l'allocation est basée sur des prévisions d'émissions à la fois pour les secteurs couverts et non-couverts par l'EU ETS, les ef-

³⁶Pour une analyse détaillée des provisions concernant les nouveaux entrants et les fermetures d'installations, voir Ellerman (2008).

³⁷La Roumanie et la Bulgarie ont rejoint l'EU ETS le 1er janvier 2007.

³⁸Le PNAQ de la Grèce a été le dernier validé au mois de juin 2005.

³⁹Au mois de janvier 2004, la Commission Européenne a transmis des consignes concernant l'implémentation des procédés d'allocation de quotas en vertu des articles 9 et 11 et de l'Annexe III de la Directive 2003/87/EC.

forts pour réduire les émissions passées durant 1990-2002 et le potentiel de réductions d'émissions. Les Etats-Membres ont notamment distingué le secteur électrique en mettant en place une allocation *plus stricte* que pour les autres secteurs étant donné son potentiel plus important en terme de réductions d'émissions. L'allocation au secteur électrique est basée sur les projections de demande d'électricité en fonction des émissions historiques et sur la variation attendue du mix de génération d'électricité. L'allocation aux secteurs non-électriques est basée sur des projections d'émissions de 2001 à 2006 en extrapolant les émissions historiques par secteur sur la période 1990 à 2001.

3. Au niveau de l'*installation* : l'approche adoptée a été celle d'une distribution gratuite de quotas. L'allocation dépend de la moyenne des émissions historiques de l'installation sur la période 2000-2002, et de sa part dans les émissions du secteur.

Les données concernant l'allocation au niveau de l'installation et du secteur sont collectées par pays et transférées au CITL. La Figure 2.8 détaille la répartition de l'allocation par industrie en 2006. Le secteur de la combustion représente la part la plus importante parmi les installations couvertes par l'EU ETS, avec 70% de l'allocation. La Figure 2.9 illustre la classification des installations du secteur combustion par activité dans l'EU ETS. Au niveau européen, la production d'électricité représente environ deux tiers de l'allocation du secteur combustion, et les autres activités le tiers restant. Pour chaque Etat-Membre, la part de l'allocation à la production d'électricité parmi le secteur combustion dépend de leur mix énergétique respectif. Les secteurs non liés à la combustion représentent 30% de l'allocation. Les secteurs de la production de ciment, de fer et les raffineries représentent 7% de l'allocation chacun. Les autres secteurs représentent 1% de l'allocation.

Emissions vérifiées et résultats annuels de conformité

La conformité avec le plafond annuel d'émissions est mesurée au niveau de l'installation par la différence entre le nombre de quotas distribués chaque année et

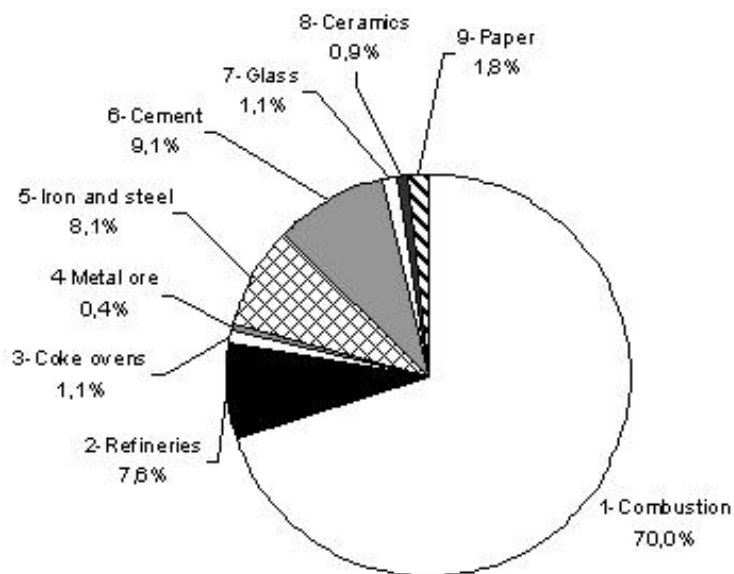


FIG. 2.4 – Répartition de l'allocation par industrie en 2006 d'après le CITL, Trotignon *et al.* (2008)

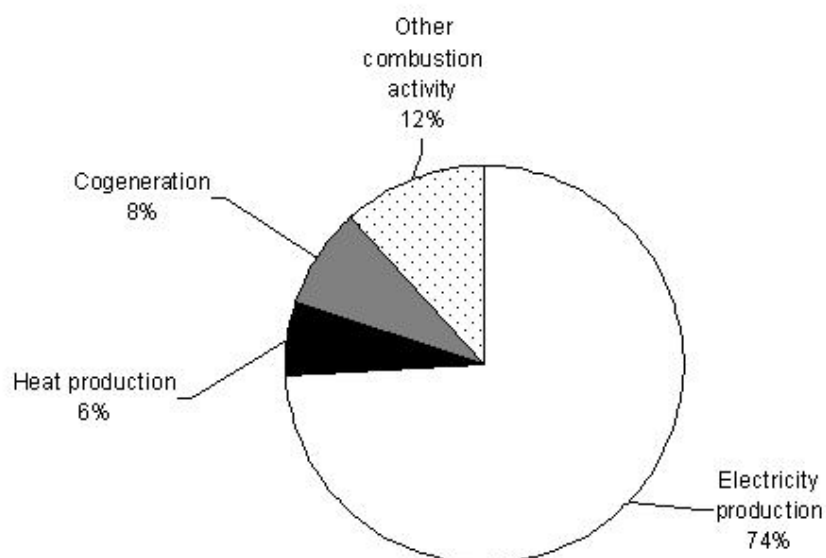


FIG. 2.5 – Caractéristiques du secteur de la combustion dans l'EU ETS d'après le CITL, Trotignon *et al.* (2008)

les émissions effectives de l'année de conformité. Cet équilibre, qualifié de position de conformité, indique la position *nette* courte/longue en terme de quotas, que ce soit par installation, par secteur, par pays ou au niveau européen, et dont nous pouvons donner la définition suivante :

Une installation est définie comme courte (longue) si elle enregistre un déficit (surplus) de quotas alloués comparativement aux émissions vérifiées. Une installation courte (longue) peut acheter (vendre) des quotas pour être en conformité (faire des profits), soit en échangeant avec les autres opérateurs de marché, soit en mutualisant les quotas entre les différentes installations d'une même firme⁴⁰. Les installations courtes (longues) sont donc potentiellement acheteuses (vendeuses) de quotas.

La Figure 2.10 détaille les positions de conformité en 2005 et 2006 par secteur. Ces chiffres indiquent la position nette courte/longue de chaque secteur en pourcentage de l'allocation. En 2005, aucun secteur n'était dans une position courte, c'est à dire avec un niveau vérifié d'émissions plus élevé que le nombre de quotas distribués. Inversement, quatre secteurs ont enregistré un niveau d'émissions *inférieur* au nombre de quotas distribués de l'ordre de 20% : ceux de la production de fer et d'acier, de la production de papier et de pulpe, de la production de céramique et les fours à coke. Les autres secteurs ont enregistré une position nette longue de 5%. Le secteur de la combustion, qui a été plus contraint, est net long de 0.6%. Le résultat global au niveau européen consiste dans une position nette longue de 4%, soit 80 MtCO₂, pendant l'année de conformité 2005. En 2006, la plupart des secteurs ont aussi été dans une position nette longue, mais dans une moindre mesure qu'en 2005. Le secteur de la combustion est le seul dans une position nette courte avec un niveau d'émissions vérifiées *supérieur* au nombre de quotas distribués de l'ordre d'1.5%. Dans l'ensemble, l'EU ETS est dans une position nette longue, mais celle-ci s'est réduite de +4% en 2005 à +2% en 2006. La Figure 2.11 détaille les résultats de conformité pour les sous-activités du secteur combustion en 2005-2006 pour sept pays : l'Autriche, la France, l'Allemagne, l'Italie, la Pologne, l'Espagne et le Royaume-Uni. Dans ces pays, le secteur combustion enregistre une

⁴⁰Cette logique est explicitée dans le Chapitre 3.

position nette courte de -8.4% en 2005 et -10.3% en 2006. Trotignon et McGuiness (2007) et Trotignon et al. (2008) confirment que la demande de quotas provient principalement des installations de production d'électricité, et l'offre de quotas des autres secteurs. Le Tableau 2.9 détaille les niveaux d'allocation et d'émission exprimés en MtCO₂. Le secteur de la combustion et le sous-secteur de la production d'électricité dominent l'ensemble des émissions dans l'EU ETS, suivis des secteurs de la production de ciment, de la production de fer et d'acier, et des raffineries.

Notons qu'une position de conformité au niveau sectoriel ne reflète pas nécessairement la situation au niveau de l'installation : un secteur peut être dans une position nette longue mais la majorité de ses installations dans une position nette courte⁴¹. Nous pouvons néanmoins supposer que dans l'EU ETS les installations du secteur électrique sont demandeuses nettes de quotas, tandis que les installations des autres secteurs sont offreuses de quotas. Suite à cette analyse des événements annuels de conformité, nous cherchons dans la sous-section suivante à décomposer leurs effets attendus, en conjonction avec l'évolution de la production industrielle, sur les changements de prix du CO₂.

Lien entre les impacts potentiels de l'évolution de la production industrielle et les événements annuels de conformité sur les changements de prix du CO₂

Le but de cette sous-section consiste à détailler explicitement les canaux à travers lesquels les changements de prix du CO₂ peuvent être affectés par l'évolution de la production industrielle dans les différents secteurs couverts par l'EU ETS.

Premièrement, nous nous intéressons à la relation entre la production industrielle et les émissions de CO₂. Les changements du niveau d'émissions des industriels dépendent de nombreux facteurs. Quelques études basées sur l'analyse par décomposition ont étudié ces facteurs dans l'Union Européenne (Greening et al. (1998), Liaskas et al. (2000), Diakoulaki et Mandaraka (2007)). Aucune de ces études ne s'est intéressée aux changements d'émissions de CO₂ provenant du secteur manufacturier dans le cadre d'un marché de quotas. Dans le cas de l'EU ETS,

⁴¹Nous détaillons ces cas de figure dans le Chapitre 3.

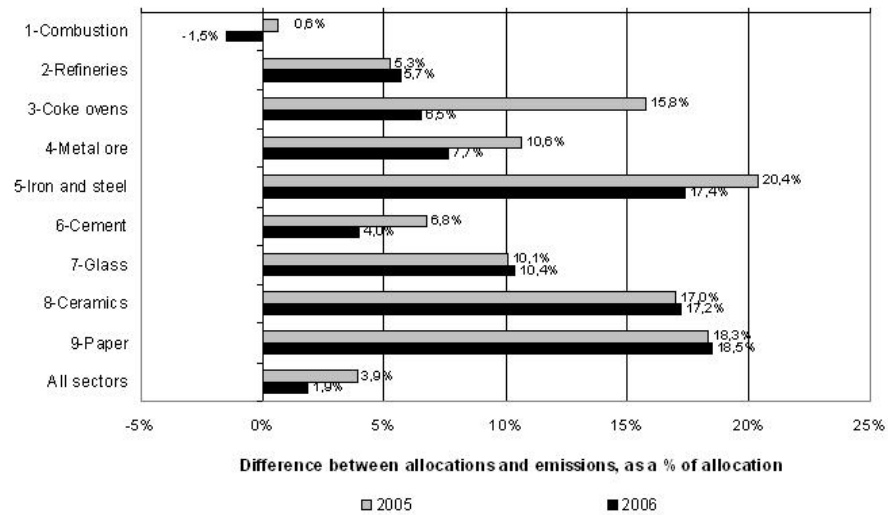


FIG. 2.6 – Position de conformité des émissions par secteur de l'EU ETS sur la période 2005-2006 d'après Trotignon *et al.* (2008)

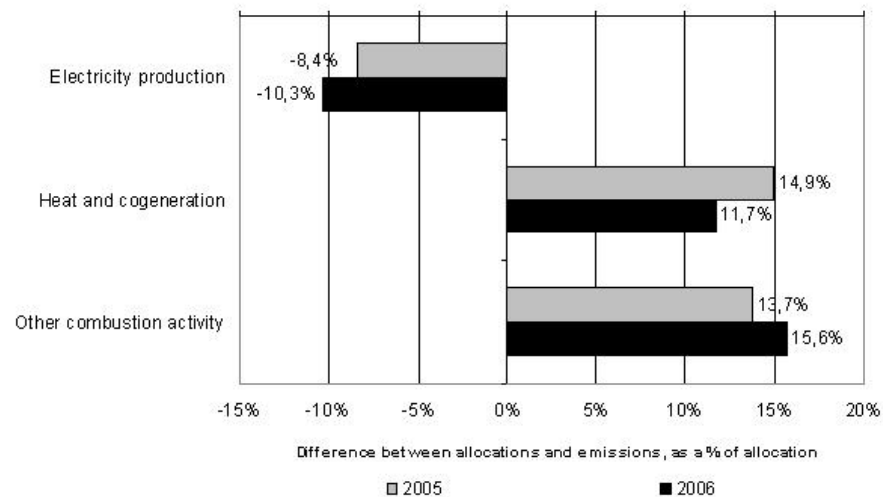


FIG. 2.7 – Position de conformité des émissions dans le secteur de la combustion sur la période 2005-2006 d'après Trotignon *et al.* (2008)

les secteurs concernés par un plafond d'émissions ont intérêt à réduire leur niveau d'émissions, soit en modifiant leur mix énergétique, soit en améliorant l'efficacité énergétique au niveau de l'installation, soit en investissant dans des technologies peu intensives en CO₂. Durant 2005-2007, la Commission Européenne et les industriels ont connu des difficultés à estimer l'écart entre l'allocation et les prévisions d'émissions des industriels⁴². Nous cherchons à capturer *ex-post* les effets liés au plafond d'émissions sur les changements de prix du CO₂ en introduisant dans notre cadre d'analyse l'effet lié au plafond d'émissions qui relie l'évolution de la production industrielle, les émissions de CO₂ correspondantes et les changements de prix du CO₂.

Deuxièmement, le lien entre les émissions de CO₂ et les changements de prix du CO₂ est basé sur le résultat annuel de conformité par installation. Le prix du CO₂ est fonction de la rareté des quotas au niveau des installations tel que nous l'avons observée durant l'évènement de conformité 2005. La position nette courte/longue en terme d'émissions doit être analysée en conjonction avec la variation de la production industrielle. Dans ce but, nous présentons dans les Tableaux 3.9 et 3.10 la position nette de conformité ainsi que le taux de croissance annuel enregistré dans chaque secteur durant 2005-2006.

A partir des Figures 2.12 et 2.13, les secteurs couverts par l'EU ETS peuvent être regroupés en quatre catégories :

1. un groupe enregistrant une variation *croissante* de la production industrielle et une position de conformité nette *longue* ;
2. un groupe enregistrant une variation *croissante* de la production industrielle et une position de conformité nette *courte* ;
3. un groupe enregistrant une variation *décroissante* de la production industrielle et une position de conformité nette *longue* ;
4. un groupe enregistrant une variation *décroissante* de la production indus-

⁴²De même, il apparaît difficile d'étudier une relation de causalité inverse entre les niveaux de prix du CO₂, les émissions de CO₂ et l'évolution de la production industrielle correspondante à cause de la disponibilité très limitée de données sur les émissions de CO₂ en continu au niveau de l'installation.

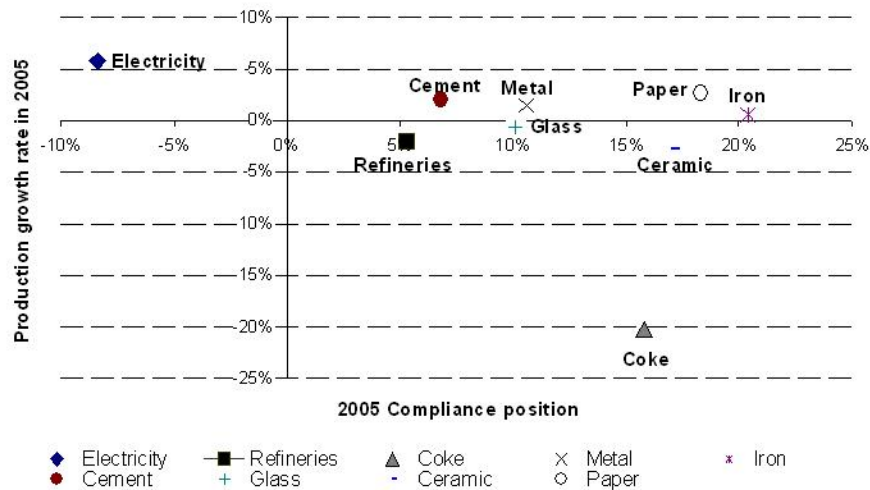


FIG. 2.8 – Position de conformité en terme d'émissions de CO₂ et taux de croissance de la production dans les secteurs couverts par l'EU ETS en 2005 d'après Eurostat, le CITL et Trotignon *et al.* (2008)

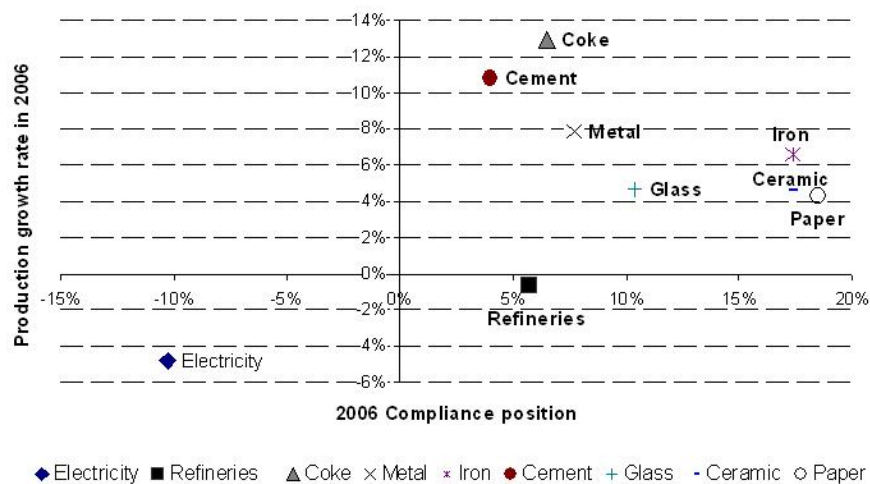


FIG. 2.9 – Position de conformité en terme d'émissions de CO₂ et taux de croissance de la production dans les secteurs couverts par l'EU ETS en 2006 d'après Eurostat, le CITL et Trotignon *et al.* (2008)

trielle et une position de conformité nette *courte*.

La logique économique sous-jacente pour décomposer les effets potentiels de la variation de la production industrielle et de la position annuelle de conformité est la suivante :

si un secteur combine une position de conformité nette courte (longue) et/ou une variation croissante (décroissante) de la production industrielle, alors ce secteur est un acheteur (vendeur) potentiel de quotas et l'impact sur le changement de prix du CO₂ devrait être positif (négatif)⁴³.

A partir de cette relation suggérée de causalité, nous examinons plus en détails deux questions dans la sous-section suivante : quels secteurs ont été identifiés comme ayant un effet statistiquement significatif sur les changements de prix du CO₂ sur la période 2005-2007 ? Parmi ces secteurs, est-il possible de décomposer l'effet dû aux pics de production industrielle, aux évènements annuels de conformité, ainsi qu'à l'interaction entre les deux ?

2.2.2 Base de données et spécification économétrique

Les données concernant les fondamentaux du prix du CO₂ liés aux prix des énergies, aux températures, et aux changements de structure ont été présentées dans la section précédente. Nous introduisons ci-dessous les données permettant de décomposer les effets potentiels de la variation de la production industrielle sur les changements de prix du CO₂ : les indices de production industrielle, et des variables dummy représentant des pics de production, les résultats de conformité et la probabilité de rareté de quotas à l'approche des évènements de conformité. Nous présentons ensuite nos spécifications économétriques.

⁴³Par exemple, d'après la Figure 2.12, le secteur électrique se trouve dans la catégorie #2 qui devrait avoir un effet *positif* sur les changements de prix du CO₂. Inversement, le secteur de la production de fer et d'acier peut être rattaché à la catégorie #3 dont nous attendons un effet *négatif* sur les changements de prix du CO₂. Les effets attendus sur les changements de prix du CO₂ sont cependant ambigus dans les catégories #1 et #4, ce qui souligne les limites de notre analyse par décomposition.

Base de données

Indices de production industrielle

Etant donné que les émissions de CO₂ ne sont pas directement observables en continu au niveau de l'installation⁴⁴, nous utilisons les indices de production mensuelle collectés dans l'EU 27 par Eurostat (2007) en utilisant la Classification NACE Rev.1 C-F (voir Tableau 2.11).

D'après la décomposition par secteurs du CITL, nous avons collecté les indices de production industrielle suivants : papier et carton, fer et acier, fours à coke, raffineries, céramique, verre, ciment, métal et combustion. Comme expliqué précédemment, le secteur électrique représente 73% de l'allocation au secteur combustion. Le choix de l'index de production et de distribution d'électricité, de gaz et de chauffage correspond donc à la plupart des activités industrielles comprises dans le secteur de la combustion. Chaque indice a une base 100 en 2000 et a été ajusté des variations saisonnières par Eurostat. Ces données ont ensuite été ré-échantillonnées pour convertir des indices mensuels en une fréquence journalière⁴⁵ (voir IEEE (1979)).

Nous développons quelques remarques préliminaires concernant l'utilisation d'indices de production industrielle. Premièrement, le choix d'indices de production sur le prix des biens produits est motivé par le fait que nous cherchons à identifier les effets de la variation du niveau de production industrielle sur les changements de prix du CO₂ à l'aide d'une estimation des émissions de CO₂ par secteur. Nous concentrons donc notre analyse sur les quantités produites⁴⁶. Deuxièmement, la question de l'endogénéité entre les prix des énergies et les indices de production ne semble pas pertinente dans la mesure où ces deux types de variables ne se recourent pas⁴⁷. Enfin, d'après la matrice des corrélations croisées entre les va-

⁴⁴Voir Ellerman et Buchner (2008) pour une discussion détaillée.

⁴⁵La fonction Matlab par L. Shure conduit une interpolation linéaire de façon à minimiser l'erreur moyenne au carré entre les données originales et leur valeur idéale.

⁴⁶Inversement, une étude portant sur le prix des biens échangés dans l'EU ETS est reliée à la question de la compétitivité des secteurs couverts par le marché de quotas, telle que nous l'avons détaillée précédemment (Reinaud (2007), Demailly et Quirion (2008a) et (2008b)).

⁴⁷Par exemple, le prix de l'électricité n'est pas corrélé avec l'indice de production industrielle du

riables sectorielles présentée dans le Tableau 2.13, aucune corrélation simple n'est supérieure à 60% en valeur absolue. Pour détecter la présence de colinéarité même à des seuils faibles de corrélation, nous avons conduit une analyse par l'inflation de la variance entre variables explicatives qui n'a pas révélé de problèmes sérieux de multi-colinéarité.

Comme détaillé dans la sous-section 2.2.1, deux raisons principales expliquent l'influence potentielle de la production industrielle sur les changements de prix du CO₂ : les pics de production et les événements annuels de conformité au niveau sectoriel. Dans le but de décomposer ces deux effets, nous définissons trois types de variables dummy pour chacun des neuf secteurs inclus dans l'EU ETS. La première variable dummy concerne le résultat annuel de conformité des émissions. Un secteur donné peut être soit dans une position nette courte, soit dans une position nette longue. La variable dummy *sectcompl*⁴⁸ est égale à 1 si le secteur enregistre une position annuelle de conformité nette *courte* et 0 sinon. La deuxième variable dummy cherche à capturer les effets des pics de production au niveau sectoriel : un pic de production est défini par une variation de 1% en valeur absolue de l'indice de production industrielle considéré⁴⁹. La variable *sectpeak*⁵⁰ est égale à 1 si le secteur enregistre un pic mensuel de production *positif* et 0 sinon.

L'effet différentiel de la position de conformité nette courte/longue *sectcompl* n'est pas forcément constant selon les catégories de la variable pics de production *sectpeak* et inversement. Dans le but de capturer l'interaction probable entre ces deux variables qualitatives, nous définissons une troisième variable dummy qui est le produit croisé des deux précédentes dummy. Ainsi, $sectcomplpeak = sectcompl * sectpeak$ est le produit croisé de la variable dummy caractéristique de positions

secteur de la combustion étant donné que ce dernier contient 1/3 d'autres sous-activités comme expliqué dans la Section 2.2.1.

⁴⁸*Sect* fait référence au secteur considéré.

Sect = *comb, iron, paper, coke, refin, ceram, glass, cement, metal*.

⁴⁹Ce seuil a été fixé en considérant le niveau moyen de la variation de la production industrielle durant 2005-2006. Nous avons expérimenté plusieurs autres proxy de la variation de la production industrielle, telles que des variations à des seuils plus élevés ou sur plusieurs mois. Nous n'avons trouvé d'effets statistiquement significatifs des pics de production que dans ce cas de figure.

⁵⁰*Sect* réfère aux mêmes secteurs considérés.

de conformité nette *courtes*, et de pics de production mensuels *positifs* pour un secteur donné.

De la même façon que pour les variables des prix des énergies, nous avons transformé les indices de production industrielle par secteur en erreur de prévision à un pas. Les tests usuels de racine unitaire révèlent que toutes les séries sont intégrées d'ordre 1 (I(1)).

Probabilité de rareté de quotas

Dans le but de mieux prendre en compte le rôle joué par la révélation d'informations, nous introduisons une variable croisée, *psq*, qui capture la probabilité de rareté de quotas autour des événements annuels de conformité. Cette variable est construite comme suit. *Difsq* calcule à la date *t* le nombre de jours restants avant l'évènement annuel de conformité. *Sq* est une variable dummy qui prend la valeur 1 durant la période allant du 30 mars au 30 avril de chaque année⁵¹ (soit avant l'annonce officielle par la Commission Européenne aux alentours du 15 mai⁵²) et 0 sinon. L'information relative à la probabilité de rareté de quotas apparaît particulièrement importante à l'approche de l'évènement annuel de conformité. L'effet potentiel de rareté de quotas, approximé par *difsq*, doit donc être uniquement considéré durant les 30 jours avant l'annonce de la Commission Européenne, tel que capturé par *sq*. C'est pourquoi nous utilisons la variable qui correspond au produit croisé des deux précédentes dummy : $psq = difsq * sq$.

Spécification économétrique

Le rôle joué par la variation de la production industrielle et les positions annuelles de conformité sur les changements de prix du CO₂ est estimé dans cette sous-section. Suivant la discussion de la sous-section 2.2.1, deux spécifications distinctes sont introduites. La première spécification identifie quels indices de production industrielle parmi les secteurs couverts par l'EU ETS ont un impact potentiel

⁵¹Pour l'année de conformité 2005, nous excluons de la construction de la variable dummy les quatre jours de fort ajustement du prix du CO₂ intervenant à partir du 24 avril 2006.

⁵²D'après la Directive Directive 2003/87/CE, la Commission Européenne doit en effet annoncer les résultats de conformité de l'année précédente le 15 mai au plus tard.

sur les changements de prix du CO₂. La deuxième spécification décompose, pour les secteurs statistiquement significatifs, l'impact potentiel des pics de production et des positions de conformité nette courtes/longues.

Est-ce que la variation de la production industrielle dans les secteurs couverts par l'EU ETS impacte les changements de prix du CO₂ ?

Nous introduisons les indices de production industrielle de tous les secteurs couverts par l'EU ETS ayant potentiellement un impact sur les changements de prix du CO₂, en plus des fondamentaux concernant les prix des énergies⁵³, les températures et les événements institutionnels identifiés dans la Section précédente.

Le modèle estimé est :

$$\begin{aligned}
 p_t = & \alpha + \beta(L)p_t + \delta break + \nu psq_{i,t} + \varphi(L)ngas_t + \gamma(L)coal_t \\
 & + \iota(L)elec_t + \kappa(L)dark_t + \lambda(L)spark_t + \sigma Win07 \\
 & + \varsigma(L)cement_t + \tau(L)refin_t + v(L)coke_t + \omega(L)comb_t + \xi(L)glass_t \\
 & + \psi(L)metal_t + \zeta(L)paper_t + \rho(L)ceram_t + \chi(L)iron_t + \epsilon_t
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Les variables liées aux prix des énergies, aux températures et aux changements de structure ont été expliquées dans la Section précédente. $psq_{i,t}$ est la probabilité de rareté de quotas pour $i = \{1, 2\}$ correspondant aux événements de conformité 2005 et 2006. Pour les variables sectorielles dans l'EU 27, $cement_t$ est l'index de production de ciment ; $refin_t$ l'index de production des raffineries ; $coke_t$ l'index de production des fours à coke ; $comb_t$ l'index de production de la combustion ; $glass_t$ l'index de production de verre ; $iron_t$ l'index de production de fer et d'acier ; $metal_t$ l'index de production de la métallurgie ; $ceram_t$ l'index de production de céramique ; et $paper_t$ l'index de production de pulpe et de papier.

Comme expliqué plus haut, cette première spécification nous permet d'identifier trois secteurs couverts par l'EU ETS dont la variation de production industrielle affecte significativement les changements de prix du CO₂ : les secteurs de la combustion, du fer et de l'acier, de la pulpe et du papier. Nous étendons donc notre

⁵³Rappelons que nous avons identifié sur l'échantillon complet que le prix du pétrole affecte les changements de prix du CO₂ à travers le prix du gaz naturel.

analyse dans la sous-section suivante à la question de savoir pourquoi ces secteurs ont un impact, basée sur l'articulation entre les pics de production et les positions de conformité.

Est-ce que les pics de production et les positions de conformité impactent les changements de prix du CO₂ ? Une analyse par décomposition

Pour décomposer les impacts potentiels des pics de production industrielle et des positions de conformité sur les changements de prix du CO₂, nous ajoutons aux indices de production industrielle statistiquement significatifs les variables dummy suivantes : $sectpeak_{i,t}$, $sectcompl_{i,t}$ et $sectcomplpeak_{i,t}$. $sect_i$ représente le secteur industriel considéré et $i = \{\text{comb, iron, paper}\}$ correspond soit au secteur de la combustion, soit à celui de la production de fer et d'acier, soit à celui de la production de pulpe et de papier qui sont significatifs suite à l'estimation de l'eq.(2.3). Nous estimons donc trois équations sous la forme :

$$\begin{aligned}
 p_t = & \alpha + \beta_i(L)p_t + \delta break_1 + \nu psq_{i,t} + \varphi(L)ngas_t + \gamma(L)coal_t \\
 & + \iota(L)elec_t + \kappa(L)dark_t + \lambda(L)spark_t + \sigma Win07 \\
 & + \omega sect_{i,t} + \varnothing sectpeak_{i,t} + \vartheta sectcompl_{i,t} \\
 & + \eta sectcomplpeak_{i,t} + \epsilon_t
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

avec $sectpeak_{i,t}$ la variable dummy capturant les pics *positifs* de production industrielle, $sectcompl_{i,t}$ la variable dummy capturant une position nette *courte* de conformité dans le secteur considéré et $sectcomplpeak_{i,t}$ la variable d'interaction capturant l'impact d'un pic *positif* de production industrielle et d'une position nette *courte* de conformité dans le secteur considéré. Les autres variables sont expliquées dans l'eq.(2.3). Les résultats d'estimation des eq.(2.3) et eq.(2.4) sont détaillés dans la sous-section suivante.

2.2.3 Résultats et discussion

Seifert et al. (2008) expliquent les sauts et la forte volatilité de la série de prix spot du CO₂ par le caractère immature du marché européen du carbone durant la Phase I et par le fait que les opérateurs de marché manquent d'expérience pour former leurs anticipations. En prenant en compte ce comportement dynamique des prix du CO₂, ainsi que la dépendance de la variabilité de la série temporelle par rapport à ses valeurs passées, Borak et al. (2006) et Benz et Truck (2006) recommandent de traiter le problème d'hétéroscédasticité par des modèles GARCH. En effet, les modèles GARCH(p, q) mis en avant par Bollerslev (1986) capturent la variance conditionnelle basée non seulement sur les valeurs passées de la série temporelle $(p_t)_{t \geq 0}$, mais également sur un processus moyenne mobile des valeurs passées de la variance conditionnelle qui s'adaptent mieux aux données. Paolella et Taschini (2008) concluent que la meilleure spécification⁵⁴ GARCH des changements des prix du CO₂, d'après le test du ratio de vraisemblance, est un modèle GARCH(1,1) asymétrique avec une loi de distribution Student- t . Ces auteurs justifient donc de travailler au moins avec un GARCH asymétrique sur la série de changements de prix du CO₂.

Par rapport à notre échantillon, nous choisissons d'implémenter un modèle⁵⁵ TGARCH(p, q) (Zakoian (1994)) avec une loi de distribution gaussienne. Le modèle TGARCH(1,1) estimé dans le Tableau 3.14 s'écrit sous la forme suivante :

$$\sigma_t = \alpha_0 + \alpha^+ (L) \epsilon_t^+ - \alpha^- (L) \epsilon_t^- + \beta (L) \sigma_t \quad (2.5)$$

où :

$$\begin{cases} \epsilon_t^+ = \max(\epsilon_t, 0) \\ \epsilon_t^- = \min(\epsilon_t, 0) \end{cases}$$

ϵ_t^+ et ϵ_t^- permettent de prendre en compte les phénomènes d'asymétrie précédemment décrits concernant la volatilité. L'effet d'un choc ϵ_{t-i} sur la variance conditionnelle dépend à la fois de l'amplitude et du signe du choc.

⁵⁴Même si les prévisions VAR basées sur cette spécification ne donnent pas des résultats entièrement satisfaisants.

⁵⁵TGARCH signifie Threshold GARCH, soit modèle GARCH à seuil.

Comme Gourieroux et al. (1984) l'ont montré, même dans le cas de résidus non-gaussiens, le choix de la loi de distribution ne conduit pas à des estimations biaisées avec la méthode d'estimation du Pseudo Maximum de Vraisemblance (PMV). Nos estimations ne sont donc pas affectées par une quelconque hypothèse concernant la loi de distribution. La matrice de la covariance entre les résidus est estimée en utilisant l'algorithme BHHH (Berndt et al. (1974)).

Cette spécification correspond bien aux statistiques descriptives des changements de prix du CO₂ reportées dans le Tableau 2.12. Premièrement, le coefficient d'aplatissement est supérieur à trois, qui correspond à la valeur d'une distribution normale. Cet excès d'aplatissement indique la forte probabilité de la présence de points extrêmes. Deuxièmement, le coefficient de dissymétrie est différent de zéro et négatif ce qui indique la présence d'asymétrie. Cette asymétrie caractérise un niveau de volatilité plus faible après les hausses de prix qu'après les baisses de prix.

Les résultats d'estimation sont présentés dans le Tableau 2.14 (voir l'Annexe B). La qualité des régressions est vérifiée à travers les tests statistiques suivants : le R^2 , le R^2 ajusté, la p-value de la statistique F-test ($F - Stat$), la Q statistique du test de Ljung-Box, le test ARCH du multiplicateur de Lagrange ($ARCHLM$), le critère d'information d'Akaike (AIC) et le critère d'information de Schwarz (SC).

L'effet des indices sectoriels de production industrielle

Par rapport à la sous-section 2.1.2, nous testons si les indices de production industrielle impactent significativement les changements de prix du CO₂, en plus des fondamentaux précédemment identifiés dans la régression (1a), Tableau 2.14. Nous conservons la même configuration des retards de la série dépendante que dans la sous-section 2.1.3. Les résultats de l'éq.(2.3) sont présentés dans le Tableau 2.14, régression (1b). Nous présentons seulement le modèle réduit de l'éq.(2.3)⁵⁶. A en juger par la p-value du F-test, la significativité jointe des coefficients est acceptée au seuil de 1%. La Q statistique du test de Ljung-Box est égale à 5.1886 pour un

⁵⁶C'est à dire, nous conservons uniquement les variables sectorielles significatives, en retirant une par une les variables non-significatives de l'éq.(2.3).

nombre maximum de retards égal à 20. Cette statistique suit une distribution du Chi-deux à $(K - p - q)$ degrés de liberté, soit 18 ici. La valeur théorique de la distribution du Chi-deux à 18 degrés de liberté est 28,87 au seuil de 5%. Par conséquent, nous acceptons l'hypothèse nulle de non autocorrélation des résidus. Le test ARCH LM ne rejette pas au seuil de 5% l'hypothèse nulle de non hétéroscédasticité autorégressive conditionnelle des résidus pour ce modèle. Nous ne commentons pas ici les résultats obtenus pour les variables liées aux prix des énergies et aux températures, étant donné la stabilité des coefficients par rapport aux estimations de la Section 2.1.3, ce qui confirme par ailleurs la robustesse de nos résultats.

Premièrement, la variable dummy de changement de structure, *break*, devient statistiquement non-significative. Le fait de perdre la significativité de la variable *break* suggère donc que l'inclusion des indices de production industrielle par secteur à notre modèle contribue à une meilleure explication des changements de prix du CO₂. Le second indicateur du rôle de la révélation d'informations sur ce marché, la variable dummy de la probabilité de rareté de quotas *psq₁*, est significative au seuil de 1%. Son signe positif reflète qu'une forte demande de quotas émane des industriels avant l'évènement de conformité 2005, contribuant ainsi à la hausse du prix du CO₂. La non-significativité de *psq₂* peut être interprétée comme une indication qu'avant l'évènement de conformité 2006 les opérateurs de marché avaient anticipé un niveau d'émissions vérifiées *plus faible* que l'allocation, et correctement géré leur position de conformité durant cette année. Ce commentaire reste valable pour les autres régressions présentées dans cette section.

Deuxièmement, parmi les neuf secteurs inclus dans l'EU ETS, trois secteurs sont statistiquement significatifs au seuil de 1% : le secteur de la combustion, de la production de fer et d'acier, et de la production de pulpe et de papier⁵⁷. Comme le montre la Figure 2.8, les secteurs de la combustion et du fer totalisent 78% de l'allocation, avec respectivement 70% et 8% des quotas alloués. Ni le secteur des raffineries, ni celui de la production de ciment n'ont été identifiés comme ayant

⁵⁷D'après le test de Klein, la comparaison du carré de la corrélation entre chacune de ces variables exogènes (Tableau 3.13) avec le coefficient de détermination de la régression (1b) (Tableau 3.14) n'indique pas de problème de colinéarité.

un impact sur les changements de prix du CO₂. Ces deux secteurs, qui totalisent respectivement 7.6% et 9.1% de l'allocation, sont caractérisés par une répartition égale des quotas entre des installations avec une position nette courte, et des installations avec une position nette longue (Trotignon et McGuinness (2007)). Une explication potentielle de la non-significativité de ces secteurs peut provenir d'une mutualisation des quotas entre les installations à l'intérieur de chaque secteur, de façon à ce que le secteur considéré soit globalement dans une position de conformité⁵⁸.

Dans la Figure 2.7, nous observons une variation *décroissante* de la production industrielle du secteur de la combustion en 2006, ce qui peut contribuer à expliquer le signe *négatif* de la variable *comb* dans la régression (1b). Au contraire, dans les Figures 2.6 et 2.7, les secteurs de la production de fer et d'acier d'une part, et de la production de pulpe et de papier d'autre part, enregistrent une variation *croissante* de la production industrielle durant 2005-2006. Nous ne pouvons donc pas expliquer à ce stage le signe *négatif* des variables *iron* et *paper*.

Comme expliqué dans la sous-section 2.2.1, d'autres effets, telle que la position nette courte/longue, peuvent expliquer l'impact d'un secteur sur les changements de prix du CO₂. C'est pourquoi nous conduisons plus avant notre analyse dans la sous-section suivante en décomposant les effets des pics de production et des positions de conformité sur les changements de prix du CO₂.

Les effets des pics de production et des positions de conformité

Comme expliqué dans la sous-section 2.2.4, nous estimons l'éq.(2.4) pour chacun des trois secteurs qui étaient significatifs dans l'éq.(2.3) (régression (1b), Table 3.14) : le secteur de la combustion, de la production de fer et d'acier et de la production de pulpe et papier.

Analyse du secteur de la combustion

Le secteur de la combustion est le secteur le plus important en taille puisqu'il représente, respectivement, 70.13% et 69.85% des émissions totales au niveau eu-

⁵⁸Cette logique présumée de mutualisation des risques est détaillée dans le Chapitre 3.

ropéen en 2005 et 2006 (Trotignon et McGuinness (2007), Trotignon et al. (2008)). Le secteur de la combustion constitue également un cas de figure intéressant car il s'agit du seul secteur caractérisé par une alternance de position nette longue (+0.6% en 2005) et nette courte (-1.5% en 2006).

Dans le Tableau 2.14, les régressions (2a) et (2b) montrent les résultats de l'éq.(2.4) pour le secteur de la combustion. Les tests de diagnostics sont validés pour ces estimations. La régression (2a) inclut *combcompl* et *combpeak*, tandis que la régression (2b) inclut ces deux variables dummy ainsi que la variable d'interaction entre elles, *combcomplpeak*. Le coefficient de *comb* est négatif dans les deux régressions. Les coefficients de *combcompl* et *combpeak* sont significatifs et positifs au seuil de 1%. Le signe de ces deux variables dummy est conforme à ce qui était attendu dans la Section 2.2.1. Dans la régression (2a), sans effet d'interaction, le taux de croissance du prix du CO₂ est *plus élevé* de l'ordre de 0.5% quand le secteur de la combustion enregistre une position nette *courte* de conformité *ceteris paribus*. Le taux de croissance du prix du CO₂ est *plus élevé* de l'ordre de 2% quand le secteur de la combustion rencontre un pic *positif* de production *ceteris paribus*. La comparaison des coefficients de *combpeak* (environ 0.02) à celui de *comb* (environ -0.07) permet d'approfondir notre analyse concernant l'impact de la variation de la production industrielle sur les changements de prix du CO₂. Le coefficient négatif de *comb* persiste même en prenant en compte l'effet de pics positifs de production. Le signe *négatif* de *comb* semble donc s'expliquer par l'évolution *décroissante* de l'activité du secteur combustion en 2006, ce qui réduit à la fois les émissions de CO₂ et la demande de quotas de ce secteur, et finalement impacte *négativement* les changements de prix du CO₂.

Ces régressions peuvent néanmoins être biaisées par le fait que nous n'avons pas pris en compte les effets potentiels d'interaction entre les variables dummy. L'effet de *combcompl* et *combpeak* sur la moyenne de p_t n'est peut être pas seulement additif comme dans la régression (2a), mais également multiplicatif comme spécifié dans la régression (2b). Nous comparons donc les résultats de l'estimation de l'éq.(2.4) (régression (2a)) avec ceux de la même équation (régression (2b)) incluant les effets d'interaction entre les variables dummy, *combcomplpeak*. Les

valeurs du R² ajusté, des critères AIC et SC indiquent que l'inclusion de la variable d'interaction permet d'obtenir une meilleure explication des changements de prix du CO₂ dûs à la variation de la production industrielle et aux positions de conformité. Les deux variables additives *combcompl* et *combpeak* ainsi que la variable d'interaction *combcomplpeak* sont significatives au seuil de 1%. Quand le secteur de la combustion enregistre une position nette *courte* de conformité et des pics de production *positifs*, le taux de croissance du prix du CO₂ est *plus élevé* de l'ordre de 2.3% ($0.0231=0.0513+0.0063-0.0345$) *ceteris paribus*. Ce résultat se situe entre 0.6% (l'effet de *combcompl* pris isolément) et 5% (l'effet de *combpeak* pris isolément).

Analyse des secteurs de la production de fer et d'acier, et de la production de pulpe et de papier

Dans cette sous-section, nous détaillons les résultats du secteur de production de fer et d'acier (régression (3), Tableau 2.14) et du secteur de production de pulpe et de papier (régression (4), Tableau 2.14). Etant donné que ces secteurs ont enregistré une position de conformité nette longue durant 2005-2006, nous ne pouvons pas instrumenter la variable d'interaction. Le secteur de production de fer et d'acier et le secteur de production de pulpe et de papier représentent respectivement 8% et 1.80% de l'allocation durant 2005-2006.

Pour chaque estimation, les deux variables sectorielles (*iron*, *ironpeak*, *paper*, *paperpeak*) sont significatives au seuil de 1%. *Iron* (régression (3)) et *paper* (régression (4)) ont un coefficient négatif, tandis que *ironpeak* (régression (3)) et *paperpeak* (régression (4)) ont un signe positif. Le signe *négatif* des variables *iron* et *paper* ne s'explique pas par l'évolution croissante de leur production industrielle⁵⁹, mais par leur position nette *longue* sur toute la période considérée. En effet, nous observons dans la Figure 2.8 que les secteurs de la production de fer et de papier ont enregistré en 2005 les positions nettes *les plus longues* du marché, avec respectivement 20.4% et 18.3% d'excès de quotas par rapport aux émissions vérifiées. Ces secteurs sont donc potentiellement *vendeurs* nets de quotas, ce qui a un effet *négatif* sur

⁵⁹2.61% en 2005 et 4.31% en 2006 pour *iron*, et 0.62% en 2005 et 4.31% en 2006 pour *paper*.

les changements de prix du CO₂. Les coefficients négatifs de *iron* et *paper* nous permettent d'identifier l'impact prédominant de la position de conformité nette *longue* sur les effets de pics d'activité dans l'explication des changements de prix du CO₂. De même, l'effet significatif de *paper* sur les changements de prix du CO₂ ne s'explique pas par sa part relativement faible de l'allocation dans l'EU ETS, mais par le fait que ce secteur enregistre une des positions les plus longues durant les événements de conformité. L'explication du signe positif observé pour *ironpeak* et *paperpeak* est similaire à celle de *combpeak* (régression (2a)) : quand un secteur enregistre un pic d'activité positif, les émissions de CO₂ augmentent, ce qui augmente en retour la demande de quotas et impacte positivement les changements de prix du CO₂.

Les deux résultats les plus importants de cette deuxième section se résument comme suit. Premièrement, nous montrons que trois secteurs parmi neuf ont un effet statistiquement significatifs sur les changements de prix du CO₂ entre le 1er juillet 2005 et le 30 avril 2007. Ces secteurs sont ceux de la combustion, de la production de fer et d'acier et de la production de pulpe et de papier, et totalisent 78% de l'allocation. Parmi eux, le secteur de la combustion représente 70% de l'allocation dans l'EU ETS et illustre le rôle central joué par les producteurs d'électricité sur ce marché. Deuxièmement, notre analyse cherche à mieux comprendre pourquoi ces secteurs sont statistiquement significatifs, en décomposant les effets dûs aux pics de production industrielle et à la position annuelle de conformité sur les changements de prix du CO₂. Pour chacun des trois secteurs précédemment identifiés, l'analyse par décomposition confirme nos intuitions : à la fois la variation de la production industrielle et la position nette courte/longue sont significatifs et ont les signes attendus sur les changements de prix du CO₂. Dans la troisième section, nous étendons *par pays* notre cadre d'analyse concernant les effets de l'évolution de la production industrielle sur les changements de prix du CO₂.

2.3 Analyse par pays des effets de la variation de la production industrielle sur les changements de prix du CO₂

Dans cette troisième section, nous choisissons de concentrer notre analyse sur les secteurs de la combustion et de la production de fer et d'acier, en fonction de leur part respective dans l'allocation⁶⁰. Avec la même approche méthodologique, nous étendons l'analyse à six des principaux pays concernés par l'EU ETS : l'Allemagne, la France, l'Italie, la Pologne, l'Espagne et le Royaume-Uni.

2.3.1 Evolution de la production industrielle par pays en 2005-2006 dans les secteurs de la combustion et de la production de fer et d'acier

Les Figures 2.14 et 2.15 montrent l'évolution de la production industrielle par pays dans, respectivement, le secteur de la combustion et celui le secteur de la production de fer et d'acier durant 2005-2006. D'après le Tableau 2.15, nous observons des évolutions très contrastées selon les pays. En 2005, le secteur de la combustion enregistre une croissance de +2.4% au Royaume-Uni en 2005 et +12.95% en Italie. En 2006, ce secteur enregistre une diminution de -1.83% en Espagne et -9.36% en Italie. Dans le secteur de la production de fer et d'acier, l'Espagne, l'Allemagne et le Royaume-Uni enregistrent en 2005 une croissance de respectivement +0.99%, +1.65% et +7.54%, tandis que l'Italie, la France et la Pologne enregistrent une contraction d'activité de, respectivement, -0.24%, -3.46% et -3.81%. En 2006, la production industrielle dans ce secteur a diminué en Espagne (-0.13%), tandis qu'elle a fortement augmenté les autres pays, allant de +2.29% en France à +17.75% en Pologne.

⁶⁰Les secteurs de la combustion et de la production de fer et d'acier représentent, respectivement, 70% et 7% de l'allocation.

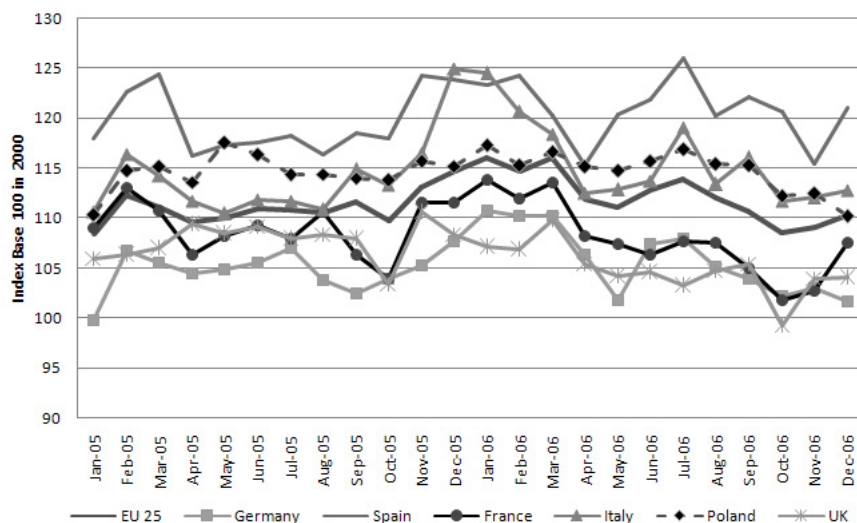


FIG. 2.10 – Evolution de la production industrielle dans le secteur de la combustion pour l’Allemagne, l’Espagne, la France, l’Italie, la Pologne et le Royaume-Uni en 2005 et 2006 basée sur la classification NACE Rev.1 C-F d’après Eurostat

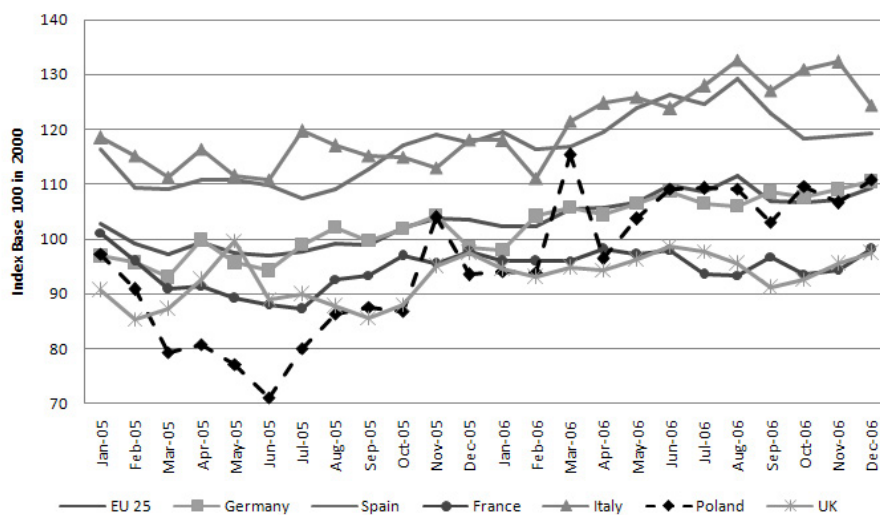


FIG. 2.11 – Evolution de la production industrielle dans le secteur de la production de fer et d’acier pour l’Allemagne, l’Espagne, la France, l’Italie, la Pologne et le Royaume-Uni en 2005 et 2006 basée sur la classification NACE Rev.1 C-F d’après Eurostat

2.3.2 Plafond d'émissions et position de conformité par pays en 2005-2006 dans les secteurs de la combustion et de la production de fer et d'acier

Les Figures 2.16 et 2.17 représentent la répartition par pays de l'allocation dans les secteurs de la combustion et de la production de fer et d'acier en 2005-2006. Dans le secteur de la combustion, nous observons que les principaux pays en terme d'allocation sont l'Allemagne (27%), la Pologne (14%) et le Royaume-Uni (11%). Dans le secteur de la production de fer et d'acier, nous observons que les principaux pays en terme d'allocation sont l'Allemagne (20%) et la France (17%).

Les Figures 2.18 et 2.19 représentent la répartition par pays des positions de conformité dans les secteurs de la combustion et de la production de fer et d'acier en 2005-2006. Ces figures indiquent pour chaque pays quelles installations sont dans une position nette courte/longue, ainsi que la position de conformité globale du secteur. Le Tableau 2.15 est également utile pour notre analyse.

En 2005, le secteur de la combustion a enregistré une position de conformité nette longue au niveau EU 27 (+0.55%). La situation est toutefois différente par pays : nous observons des positions nettes courtes pour l'Italie (-8.01%), l'Espagne (-16.08%) et le Royaume-Uni (-24.30%). Dans le secteur de la production de fer et d'acier, la plupart des pays enregistrent une position de conformité nette longue, allant de +0.08% pour le Royaume-Uni à +60,60% en Pologne.

En 2006, le secteur de la combustion a enregistré une position de conformité nette courte au niveau EU 27, avec des émissions vérifiées de l'ordre de 2.42% *plus élevées* que l'allocation. Par pays, l'Italie, l'Espagne et le Royaume-Uni ont enregistré une position nette courte avec respectivement -20.25%, -19.90% et -29.74% par rapport à leur allocation de quotas. Inversement, nous observons des positions de conformité nettes longues dans les autres pays allant de +2.21% pour la Pologne à +26.61% pour la France. Dans le secteur de la production de fer et d'acier, cinq pays enregistrent une position de conformité nette longue allant de +1.32% au Royaume-Uni à +51.88% en Pologne, tandis que l'Italie a enregistré une position nette courte de -9.47%.

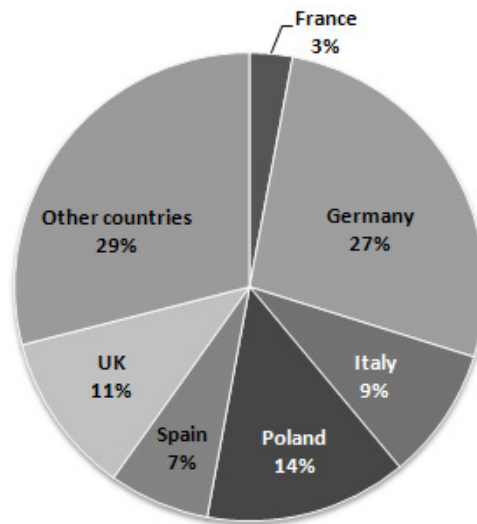


FIG. 2.12 – Allocation par pays dans le secteur de la combustion en 2005-2006 d'après le CITL, Trotignon *et al.* (2008)

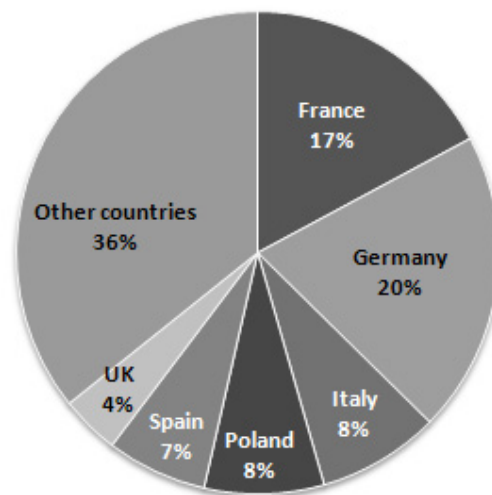


FIG. 2.13 – Allocation par pays dans le secteur de la production de fer et d'acier en 2005-2006 d'après le CITL, Trotignon *et al.* (2008)

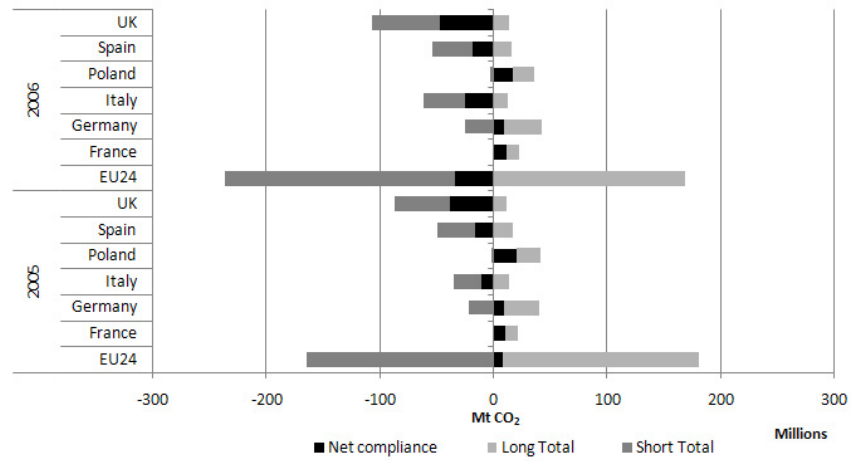


FIG. 2.14 – Positions de conformité par pays dans le secteur de la combustion en 2005-2006 d'après le CITL, Trotignon *et al.* (2008)

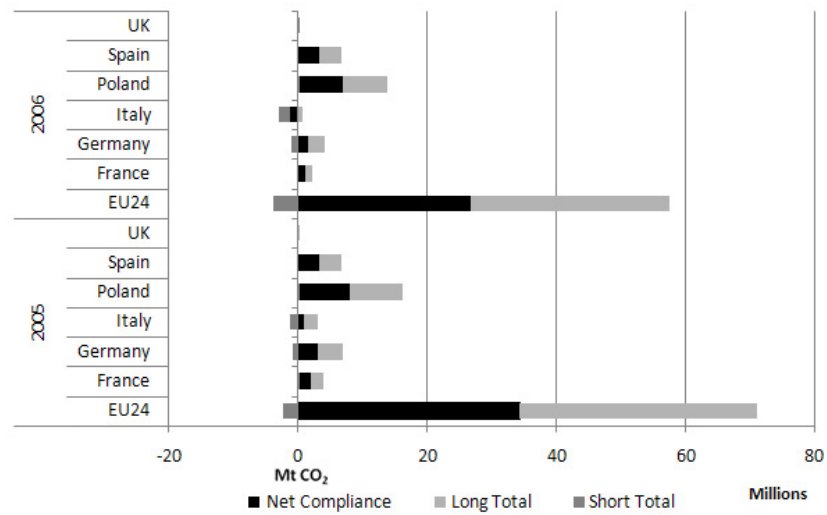


FIG. 2.15 – Positions de conformité par pays dans le secteur de la production de fer et d'acier en 2005-2006 d'après le CITL, Trotignon *et al.* (2008)

2.3.3 Base de données et spécification économétrique

Base de données

Nous utilisons les mêmes sources de données concernant les prix des énergies, les variables de températures et les événements institutionnels que dans les sous-sections 2.1.2 et 2.2.2. Par pays, nous avons réuni sur Eurostat les données relatives aux secteurs industriels considérés, à savoir ceux de la combustion et de la production de fer et d'acier, pour la France, l'Allemagne, l'Italie, l'Espagne, la Pologne et le Royaume-Uni d'après la classification NACE Rev.1 C-F.

Spécification économétrique

Suivant l'approche développée dans la sous-section 2.2.2, nous cherchons à décomposer par pays les impacts potentiels de la variation de la production industrielle et des positions de conformité sur les changements de prix du CO₂ dans les secteurs de la combustion et de la production de fer et d'acier :

$$\begin{aligned}
 p_t = & \alpha + \beta_i(L)p_t + \delta break_1 + \nu psq_{i,t} + \varphi(L)ngas_t + \gamma(L)coal_t \\
 & + \iota(L)elec_t + \kappa(L)dark_t + \lambda(L)spark_t + \sigma Win07 \\
 & + \omega sect_{i,j,t} + \emptyset sectpeak_{i,j,t} + \epsilon_t
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

où $sect_{i,j}$ est l'indice de production industrielle du secteur considéré, $i = \{\text{comb, iron}\}$ correspond soit au secteur de la combustion, soit à celui de la production de fer et d'acier, et $j = \{de, es, fr, it, pl, uk\}$ correspond à l'Allemagne, l'Espagne, la France, l'Italie, la Pologne ou le Royaume-Uni. $sectpeak_{i,j,t}$ est une variable dummy capturant les pics de production⁶¹ par pays dans le secteur considéré. Nous ne pouvons pas instrumenter la variable dummy $sectcompl$, ni la variable d'interaction $sectpeakcompl$ par pays, car nous n'observons pas d'alternance entre des positions nette courtes/longues entre 2005 et 2006. Les autres variables ont été expliquées dans l'eq.(2.3). Les résultats d'estimation de l'eq.(2.6) sont présentés dans la sous-section suivante.

⁶¹Dans cette spécification, nous avons choisi la variation de l'indice de production industrielle considéré au seuil de 2.5% en valeur absolue pour la définition d'un pic d'activité.

2.3.4 Résultats et discussion

Nous choisissons le même modèle TGARCH(p,q) asymétrique avec une loi de distribution gaussienne que dans la sous-section 2.2.2, estimé par PMV avec l'algorithme BHHH. Cette spécification correspond bien aux statistiques descriptives présentées dans le Tableau 2.16. A partir de la matrice des corrélations croisées entre variables sectorielles dans le Tableau 2.17, notre analyse basée sur l'inflation de la variance entre variables explicatives ne révèle pas de problème sérieux de multi-colinéarité. Comme expliqué dans la sous-section 2.3.2, les résultats d'estimation de l'éq.(2.6) par pays pour les secteurs de la combustion et de la production de fer et d'acier sont présentés dans les Tableaux 3.18 et 3.19 (voir l'Annexe B). Nous utilisons les mêmes tests de diagnostics que dans la sous-section 2.2.3.

Les commentaires sur des prix des énergies, des évènements de températures extrêmes et des variables de changement structurel ont été développés dans la sous-section 2.1.3. Les commentaires des indices de production industriel, des pics de production et des positions de conformité au niveau EU 27 ont été développés dans la sous-section 2.2.3.

Analyse par pays du secteur de la combustion

Dans le Tableau 2.18, les régressions (3),(4),(5) et (6) montrent les résultats de l'éq.(2.6) par pays pour le secteur de la combustion. Ces régressions correspondent au secteur de la combustion, respectivement, en Allemagne, en Pologne, en Espagne et au Royaume-Uni.

Parmi les six pays étudiés dans cette sous-section, quatre sont statistiquement significatifs et correspondent à 59% de l'allocation dans le secteur de la combustion. Nous n'avons pas trouvé d'impact significatif de la variation de la production industrielle sur les changements du prix du CO₂ en France et en Italie⁶².

⁶²D'après la Figure 2.18, le secteur de la combustion dans ces deux pays est caractérisé par une alternance d'installations ayant des positions de conformité nettes courtes et nettes longues. Cette situation peut être à l'origine d'une mutualisation des quotas entre installations, ce qui explique pourquoi nous n'observons pas d'effet statistiquement significatif. Cette logique est examinée plus en détails dans le Chapitre 3.

Premièrement, la variable *break* est statistiquement significative dans les régressions (4),(5) et (6), mais pas dans la régression (3). Le fait de perdre la significativité de *break* dans la régression (3) suggère que l'influence du secteur de la combustion en Allemagne contribue à une meilleure explication des changements de prix du CO₂ qu'en Espagne, en Pologne et au Royaume-Uni. Ce résultat est confirmé par le fait que le secteur de la combustion en Allemagne représente 27% de l'allocation totale dans l'EU ETS. Le rôle central joué par les opérateurs électriques dans l'EU ETS concernant l'activité d'échange de quotas et d'atteinte d'objectifs de réductions d'émissions de CO₂ s'applique donc particulièrement au cas de l'Allemagne qui compte quelques entreprises majeures telle que E.ON ou RWE.

Deuxièmement, pour chaque pays, les coefficients de *comb* et *combpeak* ont les signes attendus dans les régressions (3) à (6) tel que nous l'avons expliqué au niveau EU 27 dans la Section 2.2.2. Notons que le signe négatif obtenu pour *combde* dans la régression (3) et *combuk* dans la régression (6) peut s'expliquer par la variation décroissante de la production industrielle du secteur de la combustion dans ces deux pays tel que représenté dans la Figure 2.14.

Analyse par pays du secteur de la production de fer et d'acier

Dans le Tableau 2.19, les régressions (8), (9), (10) et (11) montrent les résultats de l'eq.(2.6) pour le secteur de la production de fer et d'acier, respectivement en Allemagne, en Pologne, en Espagne et au Royaume-Uni. Ce sont donc les quatre mêmes pays qui ont eu un effet statistiquement significatif dans le secteur de la combustion, et qui totalisent 39% de l'allocation du secteur de la production de fer et d'acier. De même, nous n'avons pas trouvé d'impact significatif de la variation de la production industrielle sur les changements du prix du CO₂ en France et en Italie.

Par rapport à l'analyse par pays du secteur de la combustion, la variable *break* est statistiquement significative dans toutes les régressions ((8) à (11)), ce qui renforce notre argument précédent concernant le rôle central joué par les producteurs d'électricité allemands dans l'EU ETS. Le signe *néгатif* de *iron* pour tous les pays dans les régressions (8) à (11) ne s'explique pas par une variation décroissante

de la production industrielle. Comme la Figure 2.15 le montre, la variation de la production industrielle était croissante dans tous les pays en 2005-2006. Le signe négatif s'expliquerait donc plutôt par la prédominance de la position de conformité nette *longue* de ces pays dans le secteur de la production de fer et d'acier, ainsi que nous l'observons dans la Figure 2.19⁶³.

Les coefficients de *ironpeakes* (régression (9)), *ironpeakpl* (régression (10)) et *ironpeakuk* (régression (11)) ont le signe positif attendu. La logique sous-jacente au commentaire de ces coefficients est similaire à la sous-section 2.2.2. Inversement, nous observons un signe négatif pour le coefficient de *ironpeakde* (régression (8)). A partir des Figures 2.15 et 2.19, nous observons que le secteur de la production de fer et d'acier en Allemagne est caractérisé par une variation *croissante* de la production industrielle et une position de conformité nette *longue* en 2005-2006. Comme nous l'avons évoqué dans la sous-section 2.2.2, ce cas particulier illustre que notre analyse par décomposition peut conduire à des cas intermédiaires où l'effet de la production industrielle sur les changements de prix du CO₂ est plus ambigu. En effet, le secteur allemand de la combustion est net *long* de l'ordre de 2% en 2005-2006. Cette situation ne reflète pas nécessairement la situation des opérateurs électriques majeurs de ce secteur, tels que E.ON ou RWE, qui ont enregistré une position nette *courte* sur la période comme nous le détaillons dans le Chapitre 3. Notre analyse doit donc être complétée par celle de l'activité d'échange de quotas au niveau des installations.

Conclusion

La chute du prix du CO₂ d'avril 2006 a montré qu'en l'absence de plafond d'émissions contraignant, l'introduction d'un marché de quotas ne garantit pas un prix du CO₂ suffisamment élevé pour inciter à des réductions d'émissions. Durant la Phase I de l'EU ETS, la contrainte environnementale n'est pas apparue comme

⁶³Notons que nous ne pouvons cependant pas instrumenter la variable *sectcompl*, car nous n'observons pas d'alternance entre des positions nette courtes et longues par pays entre 2005 et 2006.

suffisamment forte pour les opérateurs de marché, et le prix a donc chuté. Cet évènement particulier du développement de l'EU ETS souligne la nécessité de comprendre les mécanismes de formation du prix du CO₂. Les études théoriques identifient clairement trois types de fondamentaux : les décisions institutionnelles, les prix des énergies et les évènements climatiques. L'étude empirique du prix spot du CO₂ conduite dans le Chapitre 2 évalue l'impact de ces fondamentaux sur la période allant du 1er juillet 2005 au 30 avril 2007.

Nous avons identifié dans la première section les effets des prix des énergies, des évènements climatiques extrêmement froids non-anticipés, et des variables d'information institutionnelle sur les changements de prix du CO₂ sur la période 2005-2007. Nous avons souligné que l'influence de ces fondamentaux varie selon l'échantillon considéré, c'est à dire *avant* et *après* deux changements de structure statistiquement identifiés. L'analyse a été étendue dans la deuxième section en cherchant *i)* si la variation de la production industrielle dans les secteurs couverts par l'EU ETS est également susceptible d'affecter les changements de prix du CO₂, et *ii)* à travers quels canaux ces effets peuvent opérer. Etant donné que la Commission Européenne et les opérateurs de marché ont éprouvé des difficultés à évaluer l'écart entre l'allocation et les prévisions d'émissions des industriels, une telle analyse ne peut être conduite qu'autour des évènements annuels de conformité. Après avoir détaillé les effets attendus de la variation de la production industrielle dans les secteurs couverts par l'EU ETS et des évènements annuels de conformité, nous avons montré qu'au niveau EU 27 la variation de la production industrielle dans trois des neuf secteurs inclus dans l'EU ETS a un effet statistiquement significatif sur les changements de prix du CO₂. Ces secteurs sont ceux de la combustion, de la production de fer et d'acier et de la production de pulpe et de papier qui totalisent 78% de l'allocation. La troisième section constitue une analyse *par pays* des effets de la variation de la production industrielle sur les changements de prix du CO₂. Notre spécification économétrique a cherché à capturer les effets des pics de production et des positions de conformité dans deux secteurs qui étaient significatifs au niveau EU 27, à savoir la combustion et la production de fer et d'acier. Cette étude valide l'impact de la variation de la production industrielle sur les change-

ments de prix du CO₂ pour quatre pays (l'Allemagne, l'Espagne, la Pologne et le Royaume-Uni), et souligne le rôle central joué par les producteurs électriques allemands dans l'EU ETS.

La Commission Européenne a publié le 2 avril 2008 les émissions vérifiées pendant l'année de conformité 2007 pour 94% des installations, révélant un surplus d'allocation de l'ordre de 8% (162.5 Mt CO₂). Avec la diffusion de ces données de conformité, une analyse complète *ex-post* des fondamentaux du prix du CO₂ devient possible sur l'ensemble de la Phase I (2005-2007), en complément d'une analyse approfondie sur les abattements effectifs d'émissions de CO₂.

En lien avec l'influence des incertitudes politiques, énergétiques, climatiques et économiques sur les changements de prix du CO₂ détaillées dans le Chapitre 2, nous étudions dans le Chapitre 3 les stratégies de couverture des risques adoptées par les opérateurs de marché sur l'EU ETS.

Annexes relatives au Chapitre 2

Annexe B

2.1 Fondamentaux et changements de structure du prix du CO₂ liés aux décisions institutionnelles, aux prix des énergies et aux évènements climatiques sur la période 2005-2007

<i>Période complète</i>	Mean	Median	Max	Min	Std. Dev.	Skew.	Kurt.	N
p_t	-0.01	0.01	0.30	-0.47	0.06	-1.33	14.71	483
Brent	0.01	0.01	3.76	-2.97	1.07	-0.02	2.80	483
Natural Gas	0.01	-0.15	11.54	-10.57	1.67	0.99	14.81	483
Coal	0.01	-0.00	0.55	-0.24	0.07	1.29	13.61	483
Switch	0.01	-0.54	42.37	-38.60	6.16	0.97	14.73	483
Electricity	0.01	-0.23	24.99	-19.40	3.78	0.90	15.51	483
Clean Dark	0.01	-0.07	16.05	-11.70	2.09	1.09	19.83	483
Clean Spark	0.01	0.15	13.56	-19.34	3.18	-0.99	10.89	483

TAB. 2.1 – Statistiques Descriptives

avec p_t la série de prix du CO₂ transformée en différence première logarithmique, toutes les variables de l'énergie transformées en erreurs de prévision, *StdDev.* l'écart type, *Skew.* le coefficient de dissymétrie, *Kurt.* le coefficient d'aplatissement, et N le nombre d'observations.

<i>Période complète</i>	Probabilité F-stat.	
Eq. (2.1) ^a	0.0000	112.1917
<i>"After the compliance break" period</i>	Probabilité F-stat.	
Eq. (2.1) ^b	0.0316	16.8623

TAB. 2.2 – Statistiques du test de Chow

^a : Résultats pour les changements de structure du 20 Juin 2006 et du 25 Octobre 2006.

^b : Résultats pour le changement de structure du 25 Octobre 2006.

	<i>Période complète</i>		
	Eq.(2.1) (1)	Eq.(2.1) (2)	Eq.(2.2) (3)
Constant	0.0013 (0.0026)	0.0006 (0.0023)	0.0005 (0.0024)
Break 1	-0.0175*** (0.0057)	-0.0165*** (0.0054)	-0.0125*** (0.0049)
Break 2	-	-	-
Brent	-	-	-
Natural Gas	0.0732** (0.0305)	0.0730*** (0.0300)	0.0736** (0.0306)
Coal	-0.0978** (0.0470)	-0.0999** (-0.0471)	-0.1018** (0.0471)
Switch	-	-	-
Electricity	0.0082*** (0.0027)	0.0083*** (0.0027)	0.0079*** (0.0027)
Clean Dark	-0.0527*** (0.0148)	-0.0525*** (0.0146)	-0.0526*** (0.0148)
Clean Spark	0.0396** (0.0169)	0.0394** (0.0167)	0.0398** (0.0170)
Tempext5	-0.0097 (0.0068)		
Tempext95	0.0056 (0.0663)		
Win06			-
Win07			-0.0074** (0.0035)
R-squ.	0.3560	0.3543	0.3694
Adj. R-squ.	0.3407	0.3417	0.3558
F-Stat	0.0000	0.0000	0.0000
D.W.	1.8944	1.8892	1.8900
LM test	0.1277	0.1155	0.1472
White test	0.0002	0.0001	0.0000
AIC	-3.2974	-3.3030	-3.3226
SC	-3.1920	-3.2153	-3.2260
Procedure	NW OLS	NW OLS	NW OLS

TAB. 2.3 – Résultats d'estimation obtenus pour l'échantillon complet

*** indique un seuil de significativité à 1%, ** à 5% et * à 10%. Ecart-type entre parenthèse. Les valeurs reportées pour la F-stat sont les p-values. La procédure NW OLS signifie une estimation par les moindres carrés ordinaires, en utilisant la matrice de covariance de Newey-West pour corriger les résidus de l'hétéroscédasticité et de l'autocorrélation.

	<i>"Avant l'évènement de conformité"</i>	
	Eq.(2.1)	Eq.(2.2)
	(4)	(5)
Constant	-0.0004 (0.0018)	-0.0005 (0.0018)
Brent(-1)	0.0030** (0.0015)	0.0030** (0.0015)
Natural Gas	-	-
Coal	-	-
Switch	0.0004** (0.0002)	0.0004** (0.0002)
Electricity	0.0013** (0.0005)	0.0013** (0.0005)
Clean Dark	-	-
Clean Spark	-	-
Tempext5	0.0073** (0.0037)	
Tempext95	-0.0018 (0.0064)	
Win06		0.0018* (0.0011)
R-squ.	0.1346	0.1327
Adj. R-squ.	0.1047	0.1072
F-Stat	0.0000	0.0000
D.W.	1.9404	1.9257
LM test	0.4861	0.2906
White test	0.1635	0.1513
AIC	-4.6703	-4.6777
SC	-4.5433	-4.5665
Procedure	NW OLS	NW OLS

TAB. 2.4 – Résultats d'estimation obtenus pour le sous-échantillon "avant l'évènement de conformité"

*** indique un seuil de significativité à 1%, ** à 5% et * à 10%. Ecart-type entre parenthèse. Les valeurs reportées pour la F-stat sont les p-values. La procédure NW OLS signifie une estimation par les moindres carrés ordinaires, en utilisant la matrice de covariance de Newey-West pour corriger les résidus de l'hétéroscédasticité et de l'autocorrélation.

<i>"Après l'évènement de conformité"</i>		
	Eq.(2.1)	Eq.(2.2)
	(6)	(7)
Constant	-0.0040 (0.0031)	-0.0094** (0.0038)
Break 2	-0.0129* (0.0068)	-
Brent	0.0107*** (0.0035)	0.0106*** (0.0034)
Natural Gas	-	-
Coal	-	-
Switch	0.0089* (0.0051)	0.0090* (0.0054)
Electricity	0.0089*** (0.0024)	0.0079*** (0.0022)
Clean Dark	-0.0293*** (0.0103)	-0.0283*** (0.0108)
Clean Spark	0.0169* (0.0103)	0.0173 (0.0110)
Tempext5	-0.0302*** (0.0090)	
Tempext95	-0.0031 (0.0060)	
Win06		-
Win07		-0.0042** (0.0017)
R-squ.	0.2586	0.2673
Adj. R-squ.	0.2188	0.2353
F-Stat	0.0000	0.0000
D.W.	1.9829	1.9735
LM test	0.9962	0.9570
White test	0.0005	0.0003
AIC	-2.9672	-2.9975
SC	-2.7803	-2.8418
Procedure	NW OLS	NW OLS

TAB. 2.5 – Résultats d'estimation obtenus pour le sous-échantillon "après l'évènement de conformité"

*** indique un seuil de significativité à 1%, ** à 5% et * à 10%. Ecart-type entre parenthèse. Les valeurs reportées pour la F-stat sont les p-values. La procédure NW OLS signifie une estimation par les moindres carrés ordinaires, en utilisant la matrice de covariance de Newey-West pour corriger les résidus de l'hétéroscédasticité et de l'autocorrélation.

	<i>Jun06-Oct06</i>	<i>Oct06-Apr07</i>	
	Eq.(2.1,2.2)	Eq.(2.1)	Eq.(2.2)
	(8)	(9)	(10)
Constant	-0.0021 (0.0021)	-0.0149** (0.0070)	-0.0117* (0.0070)
Brent	0.0072** (0.0033)	0.0139** (0.0058)	0.0137** (0.0056)
Natural Gas	-	-	-
Coal	-	-	-
Switch	-	0.0100** (0.0051)	0.0097* (0.0053)
Electricity	-	0.0110*** (0.0030)	0.0095*** (0.0029)
Clean Dark	-	-0.0300*** (0.0103)	-0.0279*** (0.0106)
Clean Spark	-	0.0144* (0.0085)	0.0144 (0.0090)
Tempext5	-	-0.0269*** (0.0096)	
Tempext95	-	-	
Win07	-		-0.0035* (0.0018)
R-squ.	0.1532	0.2544	0.2656
Adj. R-squ.	0.1336	0.1975	0.2096
F-Stat	0.0000	0.0000	0.0000
D.W.	1.9745	1.9641	1.9604
LM test	0.2951	0.9600	0.7492
White test	0.0358	0.4850	0.4262
AIC	-4.7598	-2.4968	-2.5119
SC	-4.6759	-2.2734	-2.2891
Procedure	NW OLS	NW OLS	NW OLS

TAB. 2.6 – Résultats d'estimation obtenus pour les sous-périodes "Juin 2006 - Octobre 2006" et "Octobre 2006 - Avril 2007"

*** indique un seuil de significativité à 1%, ** à 5% et * à 10%. Ecart-type entre parenthèse. Les valeurs reportées pour la F-stat sont les p-values. La procédure NW OLS signifie une estimation par les moindres carrés ordinaires, en utilisant la matrice de covariance de Newey-West pour corriger les résidus de l'hétéroscédasticité et de l'autocorrélation.

	<i>Période complète</i>		<i>"Après l'évènement de conformité"</i>
	Eq.(2.1)	Eq.(2.2)	Eq.(2.2)
Constant	-0.0095*** (0.0004)	-0.0095*** (0.0005)	-0.0070*** (0.0025)
Break 1	0.0081*** (0.0026)	0.0084*** (0.0010)	
Break 2	-	-	-
Brent	-	-	0.0056*** (0.0019)
Natural Gas	0.1345*** (0.0050)	0.1349*** (0.0033)	-
Coal	-0.1928*** (0.0077)	-0.1929*** (0.0108)	-
Switch	-	-	0.0137*** (0.0012)
Electricity	0.0010*** (0.0004)	0.0011*** (0.0004)	0.0067*** (0.0021)
Clean Dark	-0.0761*** (0.0025)	-0.0763*** (0.0014)	-0.0377*** (0.0039)
Clean Spark	0.0748*** (0.0027)	0.0750*** (0.0018)	0.0283*** (0.0025)
Tempext5			
Tempext95			
Win06		-	
Win07		-0.0069** (0.0030)	-0.0083*** (0.0032)
R-squ.	0.1397	0.1782	0.2065
Adj. R-squ.	0.1173	0.1549	0.1598
F-Stat	0.0000	0.0000	0.0000
D.W.	1.4389	1.4979	1.7372
AIC	-4.2763	-4.2815	-3.4599
SC	-4.1621	-4.1586	-3.2574
Procedure	GARCH	GARCH	GARCH

TAB. 2.7 – Tests de robustesse des résultats par l'estimation d'un modèle GARCH(1,1)

*** indique un seuil de significativité à 1%, ** à 5% et * à 10%. Ecart-type entre parenthèse. Les valeurs reportées pour la F-stat et le ARCH LM test sont les p-values.

2.2 Fondamentaux du prix du CO₂ liés aux effets de la variation de la production industrielle et aux positions de conformité

Secteur UNFCCC	Activité du CITL
Energie	1. Installations du secteur de la combustion avec un taux d'input thermique excédant 20 MW ; 2. Raffineries de pétrole ; 3. Fours à coke ;
Production et de métaux ferreux	4. Installations de transformation du minerai de fer (incluant le sulfure de fer) ; 5. Installations pour la production de fer et d'acier ;
Industrie du minerai	6. Installations pour la production de clinker de ciment dans des fours rotatifs avec une capacité de production excédant 500 tonnes par jour ou chaux dans les fours rotatifs avec une production excédant 50 tonnes par jour ; 7. Installations pour la production de verre incluant la fibre de verre avec une capacité de fusion excédent 20 tonnes par jour ; 8. Installations pour la production de produits à base de céramique par ignition, en particulier tuiles de toiture, briques, tuiles, objets en grès ou en porcelaine, avec une capacité de production excédant 75 tonnes par jour ;
Autres activités	9. Usines industrielles pour la production de (a) pulpe à partir de bois ou d'autres matériaux fibreux (b) papier et carton avec une production excédant 20 tonnes par jour.

TAB. 2.8 – Décomposition des secteurs industriels couverts par l'EU ETS d'après la Directive 2003/87/CE, Annexe I

Activité du CITL	Taux de croissance annuel en 2005	Taux de croissance annuel en 2006
1. Combustion	5.87%	-4.83%
2. Raffineries de pétrole	-2.03%	-0.64%
3. Fours à coke	-20.32%	12.94%
4. Minerai de fer	1.46%	7.90%
5. Fer et acier	0.62%	6.64%
6. Ciment	2.05%	10.77%
7. Verre	-0.59%	4.70%
8. Céramique	-2.66%	4.59%
9. Pulpe et papier	2.61%	4.31%

TAB. 2.9 – Croissance de la production industrielle dans les secteurs couverts par l'EU ETS durant 2005-2006 d'après Eurostat

Activité du CITL	Allocation en 2005	Emissions en 2005	Conformité en 2005†	Allocation en 2006	Emissions en 2006	Conformité en 2006†	Nombre d'installations en 2006
1. Combustion	1465.6	1456.9	0.6%	1438.3	1459.8	1.5%	7 230
Production d'électricité*	765.5	829.8	-8.4%	747.5	824.6	-10.3%	-
Chauffage et cogénération*	144.8	123.3	14.9%	143.2	131.9	11.7	-
Autre activité de combustion*	115.7	99.6	13.7%	116.3	107.8	15.6%	-
2. Raffineries de pétrole	158.1	149.8	5.3%	157.5	148.5	5.7%	154
3. Fours à coke	22.8	10.2	15.8%	22.8	21.3	6.5%	21
4. Minerai de fer	8.7	7.8	10.6%	8.7	8.0	7.7%	12
5. Fer et acier	168.5	134.1	20.4%	168.0	138.8	17.4%	237
6. Ciment	189.6	176.8	6.8%	188.7	181.2	4.0%	543
7. Verre	22.1	19.9	10.1%	22.1	19.8	10.4%	418
8. Céramique	17.7	14.7	17.0%	17.9	14.8	17.2%	1 134
9. Pulpe et papier	36.7	30.0	18.3%	36.9	30.1	18.5%	818
Tous les secteurs	2 089.8	2 000.1	3.9%	2 060.9	2 022.3	1.9%	10 576

TAB. 2.10 – Allocation de quotas (MtCO₂), niveau d'émissions (MtCO₂) et position de conformité (en %) dans l'EU ETS durant 2005-2006 d'après le CITL, les registres nationaux, les PNAQs, Trotignon et al. (2008)

* Ces chiffres sont calculés seulement pour sept pays : l'Allemagne, la Pologne, l'Italie, l'Espagne, la France, l'Autriche et le Royaume-Uni. Leurs installations couvrent 70% des émissions du secteur de la combustion et 65% des installations de combustion (Trotignon et al. (2008)).

†Le ratio de conformité (en %) est calculé comme $\frac{Allocation\ de\ Quotas_j - Emissions_j}{Allocation\ de\ Quotas_j}$ avec $j = \{2005, 2006\}$.

Secteur EU ETS	Système de classification NACE
Décomposition	
1. Combustion	E 40 Electricité, gas, provision de vapeur et d'eau chaude
2. Fours à coke	DF 231 Produits issus de fours à coke
3. Raffineries	DF 232 Produits issus de pétrole raffiné
4. Minerai de fer	DJ 28 Produits métalliques, exceptés machineries et équipement
5. Fer et acier	DJ 271 Produits ferreux à base d'alliages basiques de fer et d'acier
6. Ciment	DI 2651 Produits à base de ciment
7. Verre	DI 261 Produits à base de verre
8. Céramique	DI 262 Produits à base de céramique
9. Papier et carton	DE 232 Produits à base de pulpe et de papier

TAB. 2.11 – Décomposition des secteurs de l'EU ETS et classification NACE Rev.1 C-F d'après Eurostat

p_t	Natural	Coal	Electricity	Clean Dark	Clean Spark
	<i>Gas</i>				
Mean	-0.0085	0.0027	-0.0002	-0.0161	-0.0036
Median	0.0000	-0.1391	-0.0026	-0.2421	-0.0747
Max	0.2973	11.5427	0.5480	24.9946	16.0509
Min	-0.4368	-10.5700	-0.2370	-19.395	-11.6950
Std. Dev.	0.0562	1.6748	0.0662	3.7817	2.0967
<i>Skew.</i>	-1.3409	0.9916	1.2958	0.9112	1.0980
<i>Kurt.</i>	14.7843	14.7610	13.6089	15.5969	19.8393
Obs.	481	481	481	481	481

	Comb	Ceram	Cement	Coke	Glass	Iron	Metal	Paper	Refin
Mean	0.0023	-0.0001	-0.0281	0.0305	-0.0189	-0.0066	-0.0104	-0.0031	0.0136
Median	0.0143	0.0014	-0.0043	0.0127	-0.0128	-0.0046	-0.0077	-0.0033	0.0222
Max	0.1833	0.1348	0.2203	0.5190	0.1237	0.1693	0.1066	0.1305	0.2344
Min	-0.2196	-0.1569	-0.4194	-0.2440	-0.3146	-0.2827	-0.1486	-0.1307	-0.2206
Std. Dev.	0.0845	0.0575	0.1441	0.1812	0.0822	0.0876	0.0538	0.0560	0.0963
<i>Skew.</i>	-0.3795	-0.1066	-0.6713	0.5496	-1.5348	-0.4112	-0.4218	-0.0965	-0.0889
<i>Kurt.</i>	2.5970	3.2708	3.0847	2.5930	6.4709	3.8076	3.0601	2.6643	3.4918
Obs.	481	481	481	481	481	481	481	481	481

TAB. 2.12 – Statistiques Descriptives

avec p_t la série de prix du CO₂ transformée en différence première logarithmique, toutes les variables des prix des énergies transformées en erreur de prévision, *StdDev.* l'écart type, *Skew.* le coefficient de dissymétrie, *Kurt.* le coefficient d'aplatissement, et N le nombre d'observations.

	Comb	Iron	Paper	Ceramics	Refineries	Cement	Glass	Metal	Coke
Comb	1								
Iron	0.0747	1							
Paper	0.2250	0.4628	1						
Ceramics	0.2307	0.0148	0.4086	1					
Refineries	0.3183	0.2472	0.0532	-0.2613	1				
Cement	-0.1268	0.1543	0.3132	0.2004	-0.5393	1			
Glass	0.0244	0.1210	0.1998	-0.0458	-0.5409	0.5968	1		
Metal	0.1654	0.4773	0.3225	-0.1060	-0.2306	0.4816	0.6396	1	
Coke	-0.1953	-0.0284	-0.3483	-0.0376	0.1602	-0.6293	-0.3762	-0.2178	1

TAB. 2.13 – Matrice de corrélations croisées entre les variables sectorielles de production industrielle

	(1a)	(1b)	(2a)	(2b)	(3)	(4)
Constant	-0.0104*** (0.0006)	-0.0104*** (0.0007)	-0.0131*** (0.0006)	-0.0132*** (0.0006)	-0.0108*** (0.0008)	-0.0083*** (0.0005)
Break	0.0075*** (0.0013)	-	-	-	-	-
Psq1		0.0002*** (0.0001)	0.0004*** (0.0001)	0.0004*** (0.0001)	0.0005*** (0.0001)	0.0008*** (0.0001)
Psq2		-	-	-	-	-
Natural Gas	0.1378*** (0.0033)	0.1305*** (0.0029)	0.1343*** (0.0029)	0.1344*** (0.0030)	0.1371*** (0.0026)	0.1353*** (0.0018)
Coal	-0.1971*** (0.0103)	-0.1775*** (0.0101)	-0.1840*** (0.0076)	-0.1842*** (0.0077)	-0.1872*** (0.0062)	-0.1841*** (0.0054)
Electricity	0.0009** (0.0004)	0.0013*** (0.0004)	0.0008*** (0.0003)	0.0010*** (0.0003)	0.0010*** (0.0003)	0.0005** (0.0002)
Clean Dark	-0.0777*** (0.0014)	-0.0742*** (0.0013)	-0.0756*** (0.0014)	-0.0758*** (0.0015)	-0.0776*** (0.0013)	-0.0750*** (0.0008)
Clean Spark	0.0767*** (0.0018)	0.0727*** (0.0016)	0.0749*** (0.0016)	0.0749*** (0.0017)	0.0765** (0.0014)	0.0756*** (0.0010)
Win07	-0.0080*** (0.0029)	-0.0191*** (0.0019)	-0.0263*** (0.0018)	-0.0259*** (0.0017)	-0.0266* (0.0018)	-0.0309*** (0.0017)
Combustion		-0.0524*** (0.0068)	-0.0671*** (0.0057)	-0.0678*** (0.0060)		
Iron		-0.0262*** (0.0059)			-0.0226*** (0.0062)	
Paper		-0.0548*** (0.0121)				-0.0447*** (0.0083)
Combpeak			0.0195*** (0.0019)	0.0513*** (0.0021)		
Combcompl			0.0051*** (0.0012)	0.0063*** (0.0012)		
Combpeakcompl				-0.0345*** (0.0029)		
Ironpeak					0.0085*** (0.0008)	
Paperpeak						0.0117*** (0.0014)
R-squ.	0.1746	0.1796	0.1394	0.1851	0.1143	0.0625
Adj. R-squ.	0.1495	0.1491	0.1073	0.1529	0.0832	0.0297
F-Stat	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Log-Likelihood	1033.271	1059.103	1091.737	1104.632	1069.825	1060.271
Q-Stat.	5.1886	5.7559	6.7367	6.5985	4.7321	7.9070
ARCH LM Test	0.1826	0.2234	0.3812	0.4285	0.5576	0.9903
AIC	-4.2965	-4.3928	-4.5305	-4.5807	-4.4423	-4.4020
SC	-4.1648	-4.2348	-4.3725	-4.4139	-4.2931	-4.2527

TAB. 2.14 – Résultats de l'estimation des eq.(2.3),(2.4) avec le modèle TGARCH(1,1)

*** indique un seuil de significativité à 1%, ** à 5% et * à 10%. Ecart-type entre parenthèse. Les valeurs reportées pour la F-stat et le test ARCH LM sont les p-values. Le modèle TGARCH(1,1) estimé est : $\sigma_t = \alpha_0 + \alpha^+ (L) \epsilon_t^+ - \alpha^- (L) \epsilon_t^- + \beta (L) \sigma_t$, avec $\epsilon_t^+ = \max(\epsilon_t, 0)$ et $\epsilon_t^- = \min(\epsilon_t, 0)$. ϵ_t^+ et ϵ_t^- permettent de prendre en compte les phénomènes d'asymétrie.

2.3 Analyse par pays des effets de la variation de la production industrielle sur les changements de prix du CO₂

		Combustion		Fer et acier	
		2005	2006	2005	2006
EU 25	Allocation ^a	68,70%	68,41%	8,01%	8,02%
	Conformité ^a	0,55%	-2,42%	20,48%	16,29%
	Production ^b	5,87%	-4,93%	0,62%	6,64%
Allemagne	Allocation ^c	27,00%	27,00%	20,00%	20,00%
	Conformité ^d	2,28%	2,21%	9,16%	4,65%
	Production ^a	7,92%	-8,13%	1,65%	12,72%
Espagne	Allocation	7,00%	7,00%	7,00%	7,00%
	Conformité	-16,08%	-19,90%	29,39%	29,11%
	Production	4,90%	-1,83%	0,99%	-0,13%
France	Allocation	3,00%	3,00%	17,00%	17,00%
	Conformité	23,37%	26,61%	6,66%	3,75%
	Production	2,39%	-5,54%	-3,46%	2,29%
Italie	Allocation	9,00%	9,00%	8,00%	8,00%
	Conformité	-8,01%	-20,25%	6,26%	-9,47%
	Production	12,95%	-9,36%	-0,24%	5,42%
Pologne	Allocation	14,00%	14,00%	8,00%	8,00%
	Conformité	9,87%	8,28%	60,60%	51,88%
	Production	4,44%	-6,05%	-3,81%	17,75%
Royaume Uni	Allocation	11,00%	11,00%	4,00%	4,00%
	Conformité	-24,30%	-29,74%	0,08%	1,32%
	Production	2,24%	-2,82%	7,54%	3,03%

TAB. 2.15 – Croissance de la production industrielle dans les secteurs de la combustion et de la production de fer et d'acier en 2005-2006

^a : Les chiffres concernant l'allocation et la position de conformité sont calculés en 2005 et 2006 au niveau EU 25 (Entrée de la Bulgarie et de la Roumanie dans l'EU ETS en 2007).

^b : Le taux de croissance de la production industrielle est calculé au niveau EU 25.

^c : L'allocation représente la part nationale dans le total de quotas distribués (en Mt CO₂) à chaque secteur dans l'EU 25.

^d : Le ratio de position de conformité (en %) est calculé comme : $\frac{\text{Allocation de Quotas}_j - \text{Emissions}_j}{\text{Allocation de Quotas}_j}$ avec $j = 2005, 2006$.

	p_t	<i>Natural Gas</i>	<i>Coal</i>	<i>Electricity</i>	<i>Clean Dark</i>	<i>Clean Spark</i>
Mean	-0.0085	0.0027	-0.0002	-0.0161	-0.0036	-0.0125
Median	0.0000	-0.1391	-0.0026	-0.2421	-0.0747	0.1524
Max	0.2973	11.5427	0.5480	24.9946	16.0509	13.5620
Min	-0.4368	-10.5700	-0.2370	-19.395	-11.6950	-19.3414
Std. Dev.	0.0562	1.6748	0.0662	3.7817	2.0967	3.1848
<i>Skew.</i>	-1.3409	0.9916	1.2958	0.9112	1.0980	-0.9863
<i>Kurt.</i>	14.7843	14.7610	13.6089	15.5969	19.8393	10.8975
Obs.	481	481	481	481	481	481

	<i>Combde</i>	<i>Combes</i>	<i>Combfr</i>	<i>Combit</i>	<i>Combpl</i>	<i>Combuk</i>
Mean	-0.0001	0.0311	-0.0249	0.0099	0.0173	-0.0059
Median	-0.0037	0.0232	-0.0070	0.0254	0.0092	-0.0055
Max	0.3492	0.3698	0.3775	0.4012	0.2577	0.3131
Min	-0.3037	-0.3269	-0.4534	-0.2906	-0.1383	-0.2768
Std. Dev.	0.1351	0.1882	0.1678	0.1562	0.0833	0.1164
<i>Skew.</i>	0.1650	0.0523	-0.1617	0.2094	0.6397	0.2433
<i>Kurt.</i>	3.0654	2.0194	3.0986	2.5803	3.3615	3.5986
Obs.	481	481	481	481	481	481

	<i>Ironde</i>	<i>Irones</i>	<i>Ironfr</i>	<i>Ironit</i>	<i>Ironpl</i>	<i>Ironuk</i>
Mean	0.0060	-0.0181	-0.0005	-0.0238	-0.0228	0.0053
Median	0.0264	-0.0022	-0.0047	-0.0275	-0.0525	-0.0068
Max	0.2856	0.2927	0.2066	0.5622	1.1582	0.4569
Min	-0.3480	-0.3994	-0.2647	-0.4912	-1.1954	-0.4469
Std. Dev.	0.1265	0.1606	0.1074	0.2247	0.4427	0.1737
<i>Skew.</i>	-0.4136	-0.2432	-0.3145	0.0664	0.2067	0.1333
<i>Kurt.</i>	3.2094	2.4634	2.5366	2.8674	3.3914	3.0447
Obs.	481	481	481	481	481	481

TAB. 2.16 – Statistiques Descriptives

avec p_t la série de prix du CO₂ transformée en différence première logarithmique, toutes les variables de l'énergie transformées en erreur de prévision, *StdDev.* l'écart type, *Skew.* le coefficient de dissymétrie, *Kurt.* le coefficient d'aplatissement, et N le nombre d'observations.

	<i>Combde</i>	<i>Combes</i>	<i>Combfr</i>	<i>Combit</i>	<i>Combpl</i>	<i>Combuk</i>	<i>Ironde</i>	<i>Irones</i>	<i>Ironfr</i>	<i>Ironit</i>	<i>Ironpl</i>	<i>Ironuk</i>
<i>Combde</i>	1											
<i>Combes</i>	-0.0801	1										
<i>Combfr</i>	0.0432	-0.0602	1									
<i>Combit</i>	0.2990	0.5215	0.2662	1								
<i>Combpl</i>	0.4486	0.3464	-0.1204	0.3746	1							
<i>Combuk</i>	0.1839	0.0126	0.6482	0.1747	0.2719	1						
<i>Ironde</i>	-0.0818	0.1920	-0.0562	-0.4216	0.1138	0.3357	1					
<i>Irones</i>	-0.0719	-0.3094	0.3853	-0.1246	-0.1844	0.0963	-0.2087	1				
<i>Ironfr</i>	-0.0813	0.0055	0.1124	0.0369	-0.1823	-0.1309	0.1261	0.1507	1			
<i>Ironit</i>	-0.0604	-0.6104	0.1245	-0.0997	-0.1195	-0.0075	-0.5787	-0.2901	0.3416	1		
<i>Ironpl</i>	-0.0924	0.0929	0.5003	-0.0994	0.0364	0.6073	0.3063	0.0613	-0.2603	0.2039	1	
<i>Ironuk</i>	0.6408	0.0218	-0.0445	0.1615	0.3265	0.2732	0.0668	-0.0245	-0.1590	-0.0342	0.0020	1

TAB. 2.17 – Matrice de corrélations croisées entre variables sectorielles de production industrielle transformées en erreur de prévision pour les secteurs de la combustion et de la production de fer et de papier en Allemagne, Espagne, France, Italie, Pologne et Royaume-Uni

	(1)	(2a)	(2b)	(3)	(4)	(5)	(6)
Constant	-0.0105*** (0.0007)	-0.0131*** (0.0006)	-0.0132*** (0.0006)	-0.0076*** (0.0005)	-0.0099*** (0.0006)	-0.0116*** (0.0007)	-0.0135*** (0.0006)
Break	-	-	-	-	-0.0024** (0.0011)	0.0091*** (0.0013)	0.0100*** (0.0014)
Psq	0.0003*** (0.0001)	0.0004*** (0.0001)	0.0004*** (0.0001)	0.0005*** (0.0001)	0.0008*** (0.0001)	0.0014*** (0.0002)	0.0005*** (0.0001)
Natural Gas	0.1309*** (0.0027)	0.1343*** (0.0029)	0.1344*** (0.0030)	0.1418*** (0.0024)	0.1344*** (0.0028)	0.1433*** (0.0033)	0.1388*** (0.0036)
Coal	-0.1795*** (0.0087)	-0.1840*** (0.0076)	-0.1842*** (0.0077)	-0.1922*** (0.0093)	-0.1912*** (0.0111)	-0.2052*** (0.0100)	-0.1956*** (0.0065)
Electricity	0.0011*** (0.0004)	0.0008*** (0.0003)	0.0010*** (0.0003)	0.0009** (0.0004)	0.0017*** (0.0004)	0.0017*** (0.0004)	0.0009** (0.0004)
Clean Dark	-0.0740*** (0.0013)	-0.0756*** (0.0014)	-0.0758*** (0.0015)	-0.0789*** (0.0011)	-0.0769*** (0.0011)	-0.0818*** (0.0017)	-0.0782*** (0.0016)
Clean Spark	0.0730*** (0.0015)	0.0749*** (0.0016)	0.0749*** (0.0017)	0.0790*** (0.0014)	0.0744*** (0.0016)	0.0800*** (0.0018)	0.0775*** (0.0020)
Win07	-0.0059*** (0.0023)	-0.0263*** (0.0018)	-0.0259*** (0.0017)	-0.0046* (0.0027)	-0.0168*** (0.0019)	-0.0094* (0.0028)	-0.0080*** (0.0028)
Combustion	-0.0548*** (0.0058)	-0.0671*** (0.0057)	-0.0678*** (0.0060)				
Iron	-0.0302*** (0.0057)						
Combpeak		0.0195*** (0.0019)	0.0513*** (0.0021)				
Combcompl		0.0051*** (0.0012)	0.0063*** (0.0012)	0.0102*** (0.0015)			
Combpeakcompl			-0.0345*** (0.0029)	-0.0250*** (0.0048)			
Combde				0.0102*** (0.0015)			
Combpeakde					0.0131*** (0.0035)		
Combes					0.0288*** (0.0019)		
Combpeakes						0.1285** (0.0068)	
Combpl						0.0068** (0.0015)	
Combpeakpl							-0.0215*** (0.0039)
Combuk							0.0089*** (0.0013)
Combpeakuk							
R-squ.	0.2060	0.1394	0.1851	0.1544	0.2034	0.1464	0.1611
Adj. R-squ.	0.1782	0.1073	0.1529	0.1248	0.1737	0.1146	0.1298
F-Stat	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Log-Likelihood	1058.415	1091.737	1104.632	1045.744	1065.211	1057.119	1059.990
ARCH LM Test	0.3020	0.3812	0.4285	0.6016	0.3644	0.5402	0.2001
AIC	-4.3942	-4.5305	-4.5807	-4.3407	-4.4186	-4.3845	-4.3966
SC	-4.2449	-4.3725	-4.4139	-4.1915	-4.2606	-4.2264	-4.2386

TAB. 2.18 – Résultats d'estimation des eq.(2.3),(2.4),(2.5) pour le secteur de la combustion au niveau EU 25 / par pays

	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Constant	-0.0108*** (0.0008)	-0.0039*** (0.0004)	-0.0135*** (0.0009)	-0.0116*** (0.0007)	-0.0109*** (0.0008)
Break	-	0.0021* (0.0012)	0.0064*** (0.0014)	0.0048*** (0.0011)	0.0036*** (0.0014)
Psq	0.0005*** (0.0001)	0.0005*** (0.0001)	0.0011*** (0.0002)	0.0004*** (0.0001)	0.0008*** (0.0001)
Natural Gas	0.1371*** (0.0026)	0.1368*** (0.0023)	0.1403*** (0.0035)	0.1353*** (0.0031)	0.1352*** (0.0028)
Coal	-0.1872*** (0.0062)	-0.1911*** (0.0054)	-0.2111*** (0.0078)	-0.1877*** (0.0089)	-0.1952*** (0.0090)
Electricity	0.0010*** (0.0003)	0.0010*** (0.0003)	0.0014*** (0.0003)	0.0008** (0.0003)	0.0014*** (0.0003)
Clean Dark	-0.0776*** (0.0013)	-0.0773*** (0.0011)	-0.0801*** (0.0019)	-0.0761*** (0.0015)	-0.0770*** (0.0013)
Clean Spark	0.0765** (0.0014)	0.0764*** (0.0013)	0.0780*** (0.0020)	0.0756*** (0.0017)	0.0752*** (0.0015)
Win07	-0.0266* (0.0062)	-0.0080*** (0.0029)	-0.0062*** (0.0024)	-0.0067* (0.0029)	-0.0204*** (0.0019)
Iron	-0.0226*** (0.0062)				
Ironpeak	0.0085*** (0.0008)				
Ironde		-0.0322*** (0.0040)			
Ironpeakde		-0.0132*** (0.0008)			
Irones			-0.0180*** (0.0041)		
Ironpeakes			0.0073*** (0.0010)		
Ironpl				-0.0040*** (0.0009)	
Ironpeakpl				0.0095*** (0.0009)	
Ironuk					-0.0226*** (0.0047)
Ironpeakuk					0.0123*** (0.0014)
R-squ.	0.1143	0.1940	0.1709	0.1913	0.1800
Adj. R-squ.	0.0832	0.1639	0.1400	0.1611	0.1494
F-Stat	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Log-Likelihood	1069.825	1055.716	1058.288	1065.738	1068.094
ARCH LM Test	0.5576	0.4741	0.3419	0.4527	0.2374
AIC	-4.4423	-4.3786	-4.3894	-4.4208	-4.4308
SC	-4.2931	-4.2205	-4.2314	-4.2628	-4.2723

TAB. 2.19 – Résultats d'estimation des eq.(2.3),(2.4),(2.5) pour le secteur de production de fer et d'acier au niveau EU 25 / par pays

Chapitre 3

Les stratégies de gestion des risques

Introduction

Nous abordons dans le Chapitre 3 le thème de la gestion des risques, qu'ils soient de nature politique, économique ou financière. A partir du 1er janvier 2005, la détention d'un quota de CO_2 parmi un portefeuille diversifié d'actifs a conduit les investisseurs à adopter des stratégies de gestion des risques spécifiques au marché européen du carbone. Les investisseurs cherchent naturellement à se couvrir contre la variation du risque lié à l'échange de quotas, et ce notamment en fonction des caractéristiques institutionnelles du marché.

Dans une première section, nous étudions l'impact des résultats de la période de conformité 2006 sur les changements dans l'aversion au risque des investisseurs. Cette étude se base en partie sur l'obtention d'une nouvelle base de données concernant les prix d'option sur le marché des produits dérivés de carbone de l'*European Climate Exchange* (ECX) à Londres. Nous cherchons à capturer l'évènement particulier du mois d'avril 2007 durant lequel la Commission Européenne a annoncé publiquement les résultats de la période de conformité concernant les émissions vérifiées au niveau des installations au cours de l'année 2006. Nous suivons la méthode existante sur le marché d'actions pour inférer empiriquement les ajuste-

ments dans l'aversion au risque sur la période 2006-2007, en estimant premièrement la distribution risque-neutre à partir des prix d'options, et deuxièmement la distribution historique à partir des séries de prix futures. Nos résultats illustrent les changements dramatiques dans la perception du risque de marché autour de l'évènement de conformité 2006 qui n'avait pas été investigué dans la littérature précédente.

Dans une deuxième section, nous abordons la question de la gestion des risques lorsque l'incertitude est liée à la variation des décisions politiques sur un marché de permis. Les permis d'émission négociables sont en effet porteurs d'incertitudes, à la fois sur leur prix futur, et sur les décisions politiques en termes de règles d'allocation entre les firmes et de dotations globales. Ces incertitudes politiques peuvent conduire à une certaine réticence des firmes à participer à l'échange de permis. En lien avec le Chapitre 1, nos résultats suggèrent que l'autorisation du stockage de permis par les firmes peut compenser ces risques, et qu'il est possible d'établir une règle optimale de partage des risques afin de pallier aux incertitudes politiques. Enfin, notre discussion empirique vise à mettre ces résultats concernant les comportements de stockage et de mutualisation des risques par les firmes dans le contexte du développement récent de l'EU ETS.

3.1 L'aversion au risque et la diffusion d'informations institutionnelles sur le marché européen du carbone : une étude des résultats de la période de conformité 2006

Nous nous focalisons dans cette première section sur le rôle de la diffusion d'informations par le régulateur, et leur importance pour la formation des anticipations des investisseurs. Dans le cadre de la négociation des PNAQs I et II, la méthode choisie d'allocation gratuite des quotas a incité les industriels concernés par l'EU ETS à négocier de généreuses dotations initiales auprès de leurs États Membres respectifs. Cette méthode de validation par la Commission Européenne

a donné lieu à certains ajustements (selon les pays ou les secteurs), mais le marché de quotas a montré, durant la Phase I au moins, sa vulnérabilité face au comportement prédateur des industriels. Dès lors, la révision de la Directive EU ETS¹ a souligné le rôle de l'autorité centrale qu'est la Commission Européenne pour établir une allocation de permis plus stricte durant la Phase II, ainsi que concernant les nouveaux secteurs devant être inclus durant la Phase III. Ce rôle de coordinateur, d'éducateur et de coercition de la Commission Européenne est au coeur de l'analyse concernant l'aversion au risque des investisseurs développée dans cette première section.

La plupart de l'information disponible au début de l'EU ETS étant considérée comme spéculative, nous cherchons à identifier statistiquement des changements dans les stratégies de couverture des risques des investisseurs autour des résultats de conformité diffusés par la Commission Européenne de façon annuelle. La publication du rapport de conformité 2006 constitue à cet égard le seul évènement observable empiriquement depuis l'introduction de produits dérivés avec comme actif sous-jacent un quota de CO₂. Cette étude constitue une première tentative d'analyse du comportement des investisseurs face au risque. Uhrig-Homburg et Wagner (2007) fournissent une description exhaustive des instruments financiers existants sur l'EU ETS, basée sur des études qualitatives. Chesney et Taschini (2008) développent un modèle de détermination du prix d'options sur l'EU ETS, mais cette étude est basée sur des simulations numériques uniquement, et non sur une validation économétrique du modèle. Notre étude contient un échantillon de prix d'options et de prix futures échangés entre le 1er octobre 2006 et le 23 novembre 2007 sur ECX.

Nous inférons empiriquement l'aversion au risque des investisseurs sur le marché européen du carbone, basée sur la relation existant entre les probabilités risque-neutre et historique mise en évidence par Leland (1980), et appliquée par Jackwerth (2000) sur les marchés d'action². Notre analyse se fonde également sur la méthode

¹Disponible à l'adresse suivante :

<http://ec.europa.eu/environment/climat/emission/reviewen.htm>.

²Il convient de noter que notre méthode pour inférer l'aversion au risque à partir des prix d'option et futures diffère légèrement de Jackwerth (2000). En effet, ce dernier effectue son

d'estimation non-paramétrique à noyau (Aït-Sahalia et Lo (2000), Cont et da Fonseca (2002)) pour estimer la distribution de probabilité risque-neutre, et sur un modèle GARCH asymétrique pour estimer la distribution de probabilité historique (Rosenberg et Engle (2002)). Cette méthode s'est avérée robuste pour l'étude des changements de l'aversion au risque implicite sur la plupart des marchés d'action.

Nous pouvons résumer les principaux résultats obtenus de la façon suivante. Premièrement, nous observons un changement dans le niveau d'aversion au risque sur l'EU ETS suivant la publication des émissions vérifiées au cours de l'année 2006 par la Commission Européenne le 30 avril 2007. Deuxièmement, nous observons une volatilité plus faible pour les contrats de maturité décembre 2008 et décembre 2009 dans l'échantillon caractérisant la période *après* l'annonce de la Commission Européenne. Ce résultat est conforme au rôle de la diffusion d'information sur les marchés financiers, qui vient réduire le niveau d'incertitude. Troisièmement, nos résultats indiquent que des périodes de prix croissants coïncident avec des périodes de plus grande volatilité. Cet effet de levier inversé suggère que, contrairement au marché d'actions, le risque associé au fait de détenir un quota de CO₂ est lié à une structure de prix *croissants* de quotas *après* l'évènement de conformité 2006. Cette situation s'explique par le fait que, dans un contexte de contrainte environnementale faible (et de prix de quotas de CO₂ faibles également), le prix ne peut que monter sur l'EU ETS. Cette situation se reflète également dans la structure par terme des prix futures.

Ces résultats illustrent de façon plus générale que la formation des anticipations des investisseurs sur le marché du carbone devient plus efficiente au fur et à mesure de la diffusion d'informations officielles par la Commission Européenne, suivant les résultats de conformité. Les investisseurs intègrent graduellement des données fiables concernant les niveaux d'émissions de CO₂ comparés aux allocations de l'ensemble des installations présentes sur ce marché. Nous mettons en évidence le rôle central joué par le régulateur durant l'évènement de conformité 2006 pour corriger

analyse sur une base mensuelle. Etant donné que notre base de données contient 13 mois, le fait de travailler en base mensuelle conduirait à trop peu d'observations. Nous préférons donc travailler avec une fréquence quotidienne.

les anticipations des investisseurs, et annoncer les futures réformes concernant le fonctionnement de l'EU ETS.

La suite de cette première section contient tout d'abord une discussion sur le comportement attendu des investisseurs vis-à-vis du risque sur le marché européen du carbone. Puis, nous détaillons les méthodes d'estimations utilisées pour inférer les probabilités risque-neutre et historique à partir, respectivement, des séries de prix d'option et de futures. Ensuite, nous présentons nos résultats empiriques.

3.1.1 Le comportement attendu des investisseurs vis-à-vis du risque sur le marché européen du carbone

La caractérisation du comportement vis-à-vis au risque, ainsi que les stratégies de gestion des risques, des investisseurs sur l'EU ETS constituent un sujet de recherche important pour plusieurs raisons.

Premièrement, les rentes distribuées aux industriels pré-existants au marché du carbone constituent une création de valeur de l'ordre de €40 milliards³ en même temps qu'une limite quantitative a été placée sur les émissions de CO₂ dans l'Union Européenne. La méthode d'allocation initiale selon les "droits du grand-père" est la plus fréquemment observée lors de la création d'un marché de quotas, étant donné que les acteurs pré-existants déterminent la taille et la nature des droits de propriété attachés à l'instauration d'une rareté sur la ressource environnementale. Les principaux avantages de cette méthode d'allocation résident dans une moindre résistance politique lors de l'instauration d'un marché de quotas pour réguler les externalités environnementales, dans la reconnaissance des acteurs de marchés historiques et des investissements spécifiques non-redéployables, dans la récompense aux premiers entrants, et dans l'économie de coûts de transaction. Depuis le 1er janvier 2005, les quotas de CO₂ constituent un actif supplémentaire dans le portefeuille de matières premières des firmes dont il convient de gérer le risque. A cet effet, l'augmentation du volume des transactions de quotas de CO₂ de 262 millions de tonnes en 2005 à 1443 millions de tonnes en 2007 reflète l'apprentissage progres-

³En comptant sur une valeur marchande de €20 par tonne de CO₂ et une allocation initiale de l'ordre de 2.2 milliards de quotas.

sif par les opérateurs de marché de ce nouvel instrument financier. Nous sommes donc particulièrement intéressés par l'examen des stratégies de gestion des risques des investisseurs liées à la diffusion d'informations officielles par le régulateur.

Deuxièmement, comme nous l'avons détaillé dans le Chapitre 2, les prix spot du CO₂ ont traversé une forte période de volatilité suite au premier évènement de conformité de l'année 2005. Les installations industrielles concernées par l'EU ETS doivent communiquer à la Commission Européenne le nombre exact de quotas figurant dans leur registre, en proportion des émissions vérifiées, chaque année à la fin du mois de mars. Cet évènement institutionnel est utilisé comme un instrument autour duquel les changements dans l'aversion au risque des investisseurs sont les plus susceptibles d'avoir lieu. Le rapport officiel de la Commission Européenne est annoncé publiquement chaque année d'ici le milieu du mois de mai⁴. Cependant, entre l'envoi de leur propre rapport et la compilation des résultats par la Commission Européenne, les opérateurs industriels ont déjà un niveau d'information satisfaisant pour approximer le niveau global d'émissions comparé aux allocations de quotas, et ajuster leurs anticipations. Rappelons qu'au mois d'avril 2006, la communication de la Commission Européenne selon laquelle le niveau d'émissions de CO₂ était *inférieur* de 3% aux allocations a résulté dans une baisse correspondante sur prix spot de 54% en quatre jours, comme le montre la Figure 3.1. Ce type particulier d'évènement institutionnel a conduit à un changement brutal dans les préférences des investisseurs et leurs stratégies de gestion des risques que nous cherchons à capturer dans cette première section. Depuis la création de l'EU ETS le 1er janvier 2005, l'évènement de conformité 2006 constitue le seul évènement observable empiriquement. En effet, la place de marché ECX a lancé en octobre 2006 des produits dérivés avec comme actif sous-jacent un quota de CO₂⁵.

Troisièmement, les quotas de CO₂ présentent les caractéristiques d'une matière première non-standard telle que définie par Paolella et Taschini (2008), dans la

⁴D'après la Directive 2003/87/CE, la Commission Européenne doit en effet publier le résultat de conformité au plus tard le 15 mai de chaque année.

⁵La publication anticipée des résultats de l'exercice de conformité 2007 ne constituera un évènement empiriquement observable que plusieurs mois après cette annonce, de façon à capturer les changements dans l'aversion au risque selon deux sous-échantillons de même taille.

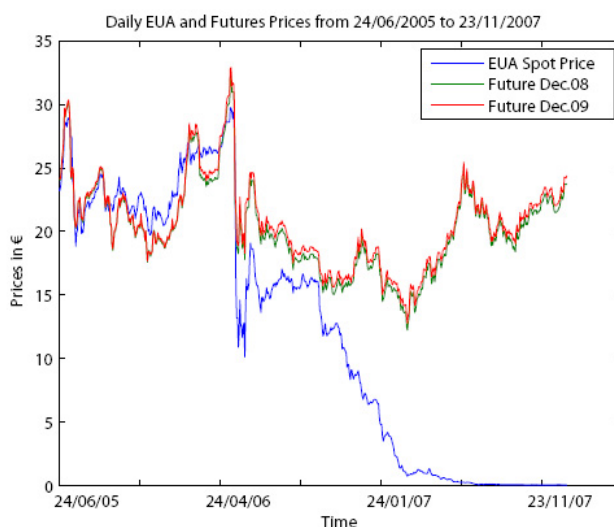


FIG. 3.1 – Prix spot du CO₂, futures de maturité décembre 2008 et décembre 2009 échangés du 24 juin 2005 au 23 novembre 2007 sur BlueNext et ECX

mesure où les installations ne doivent pas posséder physiquement des quotas pour produire, mais uniquement pour faire correspondre leur niveau effectif d'émissions avec le nombre de permis enregistrés, soit une fois par an lors de l'envoi du rapport à la Commission Européenne. De cette façon, il existe une probabilité de trappe à illiquidité, si les opérateurs de marché se retrouvent dans l'impossibilité d'acheter des quotas pour assurer leur position de conformité annuelle. Une autre spécificité des quotas d'émissions mérite d'être soulignée : en comparaison aux actions qui sont valides durant toute la durée de vie de la firme, les quotas ne sont valides que lors d'une année spécifique de conformité, et ne peuvent être utilisés pour d'autres années de conformité, à moins d'autoriser les mécanismes de flexibilité inter-temporelle⁶. Ces spécificités des quotas de CO₂, ainsi que le degré d'incertitude potentiellement élevé lié à l'échange de ce type de produit, justifient notre intérêt dans la formation de l'aversion au risque des investisseurs et de leurs stratégies d'achats/ventes de quotas aux alentours des événements annuels de conformité.

⁶Voir le Chapitre 1 pour une discussion approfondie de ces mécanismes.

Quatrièmement, d'après Seifert et al. (2007) tous les acteurs⁷ sont concernés par une estimation correcte des émissions de CO₂ et des efforts d'abatte-ments nécessaires pour respecter leur contrainte. Nous testons l'hypothèse selon laquelle de forts renversements d'anticipations des investisseurs interviennent lors du résultat de conformité 2006. Nous attendons un niveau *plus faible* de volatilité *après* la diffusion d'informations par la Commission Européenne, qui fournit une mise à jour fiable concernant les émissions vérifiées relativement aux quotas distribués.

En fonction des caractéristiques propres aux quotas de CO₂ en termes de volumes échangés et de développement du prix, nous avons détaillé dans quelle mesure la diffusion d'informations par la Commission Européenne est la plus susceptible d'avoir un effet structurant sur les ajustements des comportements des investisseurs vis-à-vis du risque. Dans la sous-section suivante, nous présentons notre stratégie d'estimation pour identifier statistiquement les changements attendus dans l'aversion au risque des investisseurs lors de l'évènement de conformité 2006.

3.1.2 Méthode d'estimation

Bertholon et al. (2007) détaillent différentes méthodes pour traiter le problème de l'estimation de l'aversion au risque. L'aversion absolue au risque peut être exprimée en fonction des distributions de probabilité risque-neutre et historique tels que l'ont mis en évidence Leland (1980), Aït-Sahalia et Lo (2000), Jackwerth (2000), Rosenberg et Engle (2002)⁸ :

$$RA(x) = \frac{f'(x)}{f(x)} - \frac{q'(x)}{q(x)} \quad (3.1)$$

où $q(x)$ est la densité risque-neutre, et $f(x)$ la densité historique. Lorsque ces deux densités sont connues, la troisième est recouvrable par produit. Dans cette première section, nous disposons de suffisamment de données pour estimer à la fois les distributions risque-neutre et historique sans faire d'hypothèse sur les

⁷Et non seulement le secteur électrique, qui a été le plus contraint lors de l'allocation initiale.

⁸Voir l'Annexe C pour un rappel sur la relation entre les distributions risque-neutre, historique et l'aversion au risque dans la littérature sur le noyau de prix.

préférences des investisseurs en matière de risque. Il est donc possible de déduire l'aversion au risque de notre estimation des mesures de probabilité risque-neutre et historique. Selon la terminologie établie par Bertholon et al. (2007), cette approche s'inscrit dans la stratégie " *Risk-Neutral Constrained Direct Modelling*", à savoir nous faisons une faible hypothèse sur les distributions historique et risque-neutre, et pas d'hypothèse sur le noyau de prix. Soulignons que le noyau de prix dépend usuellement de nombreuses variables d'état, telles que la consommation, la production industrielle, ou des agrégats économiques plus spécifiques. Etant donné ce nombre potentiellement élevé de variables d'état, l'approche usuellement adoptée dans l'estimation du noyau de prix consiste à choisir une *seule* variable d'état appropriée. Cette variable est sélectionnée pour son pouvoir explicatif : la projection de tout facteur approprié dans le sous-état couvert par cette variable doit contenir autant d'informations que possible concernant l'aversion au risque. La variable couramment retenue dans la littérature consiste à choisir l'index de marché lui-même, dont l'évolution temporelle révèle beaucoup d'informations concernant les changements d'anticipations des investisseurs. Le noyau de prix estimé est donc appelé noyau de prix *projeté*⁹. Nous suivons l'approche développée par Cochrane (2002), et dont Rosenberg et Engle (2002) fournissent une discussion.

D'après Aït-Sahalia et Lo (2000), nous estimons la distribution risque-neutre de façon non-paramétrique, tandis que la distribution historique est estimée avec un modèle GARCH semi-paramétrique (Barone-Adesi et al. (2008), Rosenberg et Engle (2002)). Comme expliqué ci-dessus, nous déduisons de ces estimations une estimation empirique de l'aversion au risque. Cette méthode nous permet d'examiner les caractéristiques empiriques de l'aversion au risque des investisseurs sur le marché européen du carbone, ainsi que les changements potentiels d'anticipations intervenant lors de l'évènement de conformité 2006. Nous détaillons dans un premier temps comment inférer les distributions de probabilité risque-neutre et historique.

⁹Voir également un rappel dans l'Annexe C.

3.1.3 Distribution de probabilité risque-neutre

En l'absence d'arbitrage, le prix d'une option d'achat (*call*) européenne s'écrit :

$$C(\tau, K) = B(\tau) \int_{-\infty}^{+\infty} (S_T - K) q(S_T) dS_T = B(\tau) \mathbb{E}^Q [(S_T - K)^+] \quad (3.2)$$

où $C(\tau, K)$ est le premium d'une option d'achat de maturité τ et de prix d'exercice K , S_T est le prix de l'actif sous-jacent à la date de maturité, et r est le taux d'intérêt sans risque. $B(\tau)$ est le prix d'une obligation zéro-coupon de maturité τ , et représente le facteur d'actualisation correspondant, c'est à dire $B(\tau) = e^{-r\tau}$. $\mathbb{E}^Q[\cdot]$ représente l'espérance utilisée dans la distribution risque-neutre. D'après Breeden et Litzenberger (1978), nous pouvons écrire :

$$\frac{\partial^2 C(\tau, K)}{\partial K^2} = B(\tau) q(S_T | S_T = K). \quad (3.3)$$

L'équation (3.3) décrit la relation formelle entre la seconde dérivée du prix de l'option d'achat par rapport au prix d'exercice et la densité risque-neutre. Nous sommes intéressés par estimer le noyau de prix "moyen" sur le marché d'option. Pour ce faire, nous utilisons l'estimateur non-paramétrique de la densité risque-neutre d'Aït-Sahalia et Lo (2000). Cet estimateur utilise le lien entre la volatilité implicite et la distribution risque-neutre : étant donné que la volatilité implicite et la distribution risque-neutre dépendent de la *moneyness*, il est possible d'inférer la distribution risque-neutre à partir des séries de volatilité implicites. Quand la volatilité implicite, notée $\sigma(K)$, est une fonction du prix d'exercice et différentiable deux fois, en utilisant le modèle de Black-Scholes et le résultat de l'éq.(3.3), Andersen et Wagener (2002) montrent que :

$$q(S_T | S_T = K) = e^{r\tau} \frac{\partial^2 C}{\partial K^2} \quad (3.4)$$

$$= \left(\frac{1}{\sigma(K)K\sqrt{\tau}} + \left(\frac{2d_1}{\sigma(K)} \right) \frac{\partial \sigma}{\partial K} + \left(\frac{d_1 d_2 K \sqrt{\tau}}{\sigma} \right) \left(\frac{\partial \sigma}{\partial K} \right)^2 + K \sqrt{\tau} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial K^2} \right) N(d_1) \quad (3.5)$$

Lorsque $\sigma(\tau, K)$ est exprimé en fonction du prix d'exercice, il peut être estimé soit de façon paramétrique avec un polynôme¹⁰, soit de façon non-paramétrique. Aït-Sahalia et Lo (2000) recommandent l'utilisation d'un estimateur non-paramétrique de la surface de volatilité (voir également Cont et da Fonseca (2002)). Cet estimateur est particulièrement adapté à des situations où nous ne cherchons pas un estimateur quotidien de la fonction de densité, mais un estimateur de la distribution risque-neutre *moyenne* sur un horizon temporel plus long. Cette approche est similaire à celle adoptée dans Jackwerth (2000). Nous optons pour la méthode non-paramétrique, qui offre l'avantage d'être plus robuste aux anomalies de marché susceptibles de se produire sur le marché récemment créé du carbone. Nous introduisons un estimateur non-paramétrique Nadaraya-Watson, avec $k = \frac{K}{S}$ la *moneyness*, et τ fixé comme dans Cont et da Fonseca (2002) :

$$\sigma(k, \tau) = \frac{\sum_{i,j} K\left(\frac{\tau - \tau_i}{h_1}\right) K\left(\frac{k - k_j}{h_2}\right) \sigma(\tau_i, k_j)}{\sum_{i,j} K\left(\frac{\tau - \tau_i}{h_1}\right) K\left(\frac{k - k_j}{h_2}\right)} \quad (3.6)$$

avec

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2} \quad (3.7)$$

le noyau Gaussien. $\{h_1, h_2\}$ sont des paramètres qui déterminent le degré de lissage. Comme le remarquent Cont et da Fonseca (2002), des valeurs trop faibles de ces paramètres conduisent à une surface irrégulière, tandis que des valeurs trop grandes conduisent à un lissage pouvant omettre des détails importants. Nous utilisons la méthode développée par Brockmann et al. (1993) pour obtenir un paramètre optimal h . Nous pouvons ensuite différentier cet estimateur non-paramétrique de la volatilité implicite par rapport au prix d'exercice, et l'utiliser dans l'éq.(3.5) pour inférer finalement la distribution risque-neutre pour un horizon donné τ . Notons que cette méthode impose des restrictions de martingalité par produit qui sont essentielles pour inférer la distribution risque-neutre (Jurczenko et al. (2001)).

¹⁰Sur ce point, voir Andersen et Wagener (2002) et Briere (2006).

Nous rappellons à présent comment obtenir les séries de volatilité implicite à partir des prix d'option. En utilisant les mêmes notations, $C(\tau, K)_{obs}$ est le prix observé d'une option d'achat, et $C(\tau, K, \sigma)_{BS}$ le prix de Black-Scholes (BS) obtenu en utilisant la volatilité implicite σ . Par définition, nous avons $C(\tau, K)_{obs} = C(\tau, K, \sigma)_{BS}$. La volatilité implicite du prix d'exercice est obtenue en inversant numériquement la formule Black-Scholes, ce qui revient à résoudre :

$$\min_{\sigma} (C(\tau, K)_{obs} - C(\tau, K, \sigma)_{BS})^2 \quad (3.8)$$

Ensuite, en tenant compte de σ en fonction du prix d'exercice, on peut utiliser l'éq.(3.3) pour inférer la distribution risque-neutre.

Nous discutons finalement les différences entre les prix de marché observés et les prix calculés à partir du modèle de Black-Scholes. Les Figures 3.2 et 3.3 comparent les prix d'option de maturité décembre 2008 et décembre 2009 échangés sur le marché du carbone, avec le prix de référence issu du modèle de Black-Scholes. Nous comparons les ordres de marché effectivement enregistrés avec le prix de Black-Scholes, calculé en utilisant la volatilité implicite à-la-monnaie. Les Figures 3.2 et 3.3 représentent l'erreur moyenne de valorisation du prix en valeur absolue¹¹. Nous suivons ici le critère présenté par Barone Adesi et al. (2008). Soit $C(t, K)$ le prix réel de l'option, et $C(t, K)_{BS}$ le prix correspondant dans le modèle de Black-Scholes. Le critère de l'erreur moyenne de valorisation du prix en valeur absolue¹² s'écrit comme suit :

$$AARME(K) = \sum_t \frac{|C(t, K) - C(t, K)_{BS}|}{C(t, K)} \quad (3.9)$$

pour un niveau donné de *moneyness* K . D'après les Figures 3.2 et 3.3, les prix d'option sur le marché du carbone conduisent à des erreurs de valorisation de prix standards pour les marchés de matières premières ou d'actions (voir les résultats obtenus par Barone Adesi et al. (2008)). Les erreurs de valorisation sont

¹¹L'abscisse et l'ordonnée représentent, respectivement, la *moneyness* et le critère de l'erreur moyenne de valorisation du prix en valeur absolue en fonction de la *moneyness*.

¹²*Average Absolute Relative Mispricing Error* (AARME) en anglais.



FIG. 3.2 – Erreurs de valorisation des prix d’option entre le marché du carbone et le prix de référence du modèle de Black-Scholes pour le contrat de maturité décembre 2008

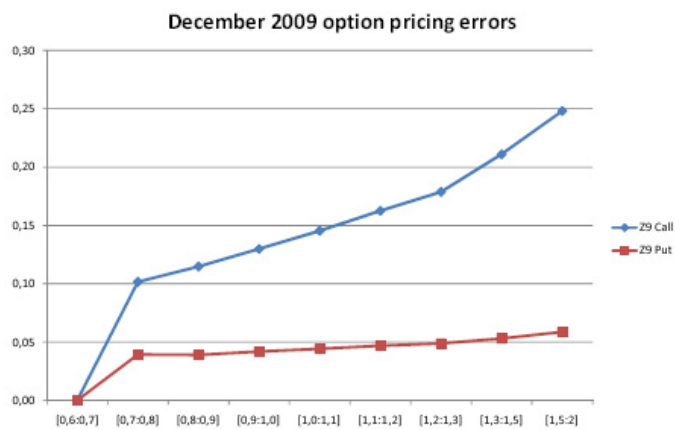


FIG. 3.3 – Erreurs de valorisation des prix d’option entre le marché du carbone et le prix de référence du modèle de Black-Scholes pour le contrat de maturité décembre 2009

principalement dûes au problème du *smile* que nous discutons ci-après. Nous observons que l'erreur de valorisation croît avec la *moneyness*. Une caractéristique intéressante de ces erreurs de prix réside dans le fait que les déviations du modèle de Black-Scholes sont moins importantes pour les options de vente que pour les options d'achat. Comme nous le détaillons par la suite, le risque est lié à une *augmentation* du prix du quota sur le marché du carbone. Dans cette situation, la meilleure stratégie de couverture des risques consiste à vendre des options d'achat. Les prix d'options d'achat sont donc échangés plus activement que les options de vente. Cette stratégie est conforme à la mesure de la déviation du modèle de Black-Scholes que nous mesurons dans les Figures 3.2 et 3.3. Nous présentons dans ce qui suit la méthode utilisée pour inférer la distribution historique.

3.1.4 Distribution de probabilité historique

Il existe un courant de littérature émergent sur la parité des séries de prix spot et futures dans l'EU ETS. Seifert et al. (2007) soulignent la forte volatilité du prix du spot lors de l'évènement de conformité 2005. Borak et al. (2006) notent que la structure par terme des prix des quotas de CO₂ est passée d'une situation initiale de *backwardation* à une situation de *contango*¹³, et reste sujette à des changements abrupts suite aux variations des anticipations des investisseurs. Comme nous l'avons identifié dans la Figure 3.1, cette situation fournit un premier élément de justification pour utiliser la série de prix futures, plutôt que les spots, dans notre base de données.

En octobre 2006, suite à de nombreuses annonces¹⁴ de la Commission Européenne de règles d'allocations plus restrictives durant la Phase II, nous observons

¹³Rappelons qu'une situation où les prix futures sont *plus élevés* que les prix spot est appelée *contango*, et est généralement associée à un marché où l'offre est supérieure à la demande. De même, la situation où les prix futures sont *moins élevés* que les prix spot est appelée *backwardation*, et est généralement associée à un marché où l'offre est faible.

¹⁴EC SPEECH/06/624 disponible à l'adresse :
<http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=SPEECH/06/624&format=HTML&aged=1&language=EN&guiLanguage=en>.

en Figure 3.1 un divorce entre la série des prix spot et futures¹⁵. Tandis que la série de prix spot décroît asymptotiquement vers zéro, la série de prix futures se stabilise autour de €20 la tonne de CO₂. Au-delà de la perception d'une plus grande rareté de quotas durant la Phase II, ce signal prix est maintenu sur le moyen terme par la confirmation de la Commission Européenne de l'existence de l'EU ETS au moins jusqu'en 2020. Les futures semblent mieux refléter que les spots les anticipations des investisseurs et leurs stratégies de gestion des risques, nous choisissons donc de travailler à partir des séries de prix futures pour inférer la distribution historique.

Depuis ce divorce entre les séries de prix spot et futures, la relation *cost-of-carry* issue de la littérature sur les coûts d'inventaire (Fama et French (1987, 1988), Brennan (1991), Pindyck (1994)) reliant les prix spot et futures ne tient plus. Dans ce but, nous calculons l'écart entre chaque contrat de maturité Décembre 2008 et décembre 2009, actualisés au taux swap sans risque à un an. Comme le montre la Figure 3.4, cet écart entre les deux contrats futures n'est pas linéaire, mais caractérisé par des variations abruptes. Cette inspection visuelle des données révèle que les séries de prix futures ont un comportement distinct de celui du prix spot.

Cette intuition est confirmée par un test statistique de la relation d'absence d'arbitrage qui devrait être vérifiée entre les séries de prix spot et futures (voir l'Annexe C). Dans le Tableau 3.1, les résultats du test statistique révèlent que l'hypothèse nulle de l'absence d'écart entre les contrats de maturité décembre 2008 et décembre 2009 est rejetée au seuil de 1%. Ce résultat démontre statistiquement que la relation *cost-of-carry* n'est pas vérifiée, et renforce notre démarche d'utiliser les séries de prix futures, plutôt que les spots, dans notre base de données. Etant donné que les séries de prix futures traduisent un comportement différent du prix spot, et semblent refléter correctement les anticipations des investisseurs sur le moyen-terme, nous avons deux possibilités dans le traitement des données : soit modéliser les séries de prix futures en fonction de leur maturité, soit trouver un modèle adéquat de détermination du prix des contrats futures sur le marché du carbone. En l'absence d'un tel modèle représentant la structure par terme des prix

¹⁵Voir l'Annexe C pour un test statistique de ce divorce entre prix spot et futures.

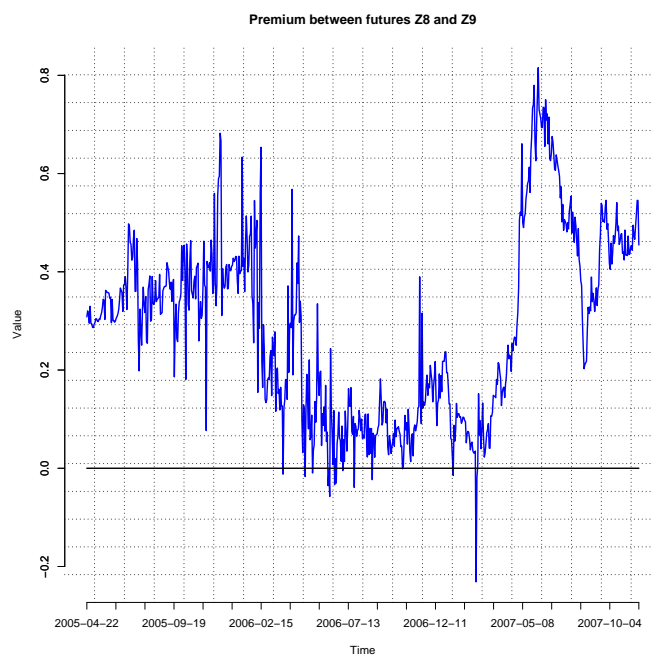


FIG. 3.4 – Écart entre les contrats futures de maturité décembre 2008 et décembre 2009

futures, nous choisissons de travailler avec deux séries de prix distinctes, à savoir les contrats de maturité décembre 2008 et décembre 2009.

Ielpo et Guégan (2008) nous permettent d'ajouter un dernier argument pour justifier le choix des séries de prix utilisées dans notre base de données concernant la distribution historique : étant donné que les quotas de CO₂ basés sur des prix spot ont été moins fréquemment échangés jusqu'à la fin de la Phase I, nous préférons travailler avec les séries de prix futures qui reflètent de façon plus adéquate les changements dans la formation des anticipations des investisseurs et leurs stratégies de couverture des risques. Cette approche est conforme à celle adoptée par Paolella et Taschini (2008), qui argumentent que l'utilisation des prix spot à des buts de prévision est rendue difficile par l'incertitude liée aux décisions politiques prévalant lors de la mise en place du marché européen d'échange de quotas de CO₂. Nous avons donc justifié notre choix d'utiliser les séries de prix futures décembre 2008 et décembre 2009¹⁶. En ce qui concerne la méthode d'estimation, Benz et Truck (2006) et Paolella et Taschini (2008) recommandent l'utilisation de spécifications à base de modèles GARCH concernant les rendements des quotas de CO₂, ce qui est conforme à l'approche développée ci-dessous.

Suivant la littérature spécifique aux marchés boursiers¹⁷, nous proposons de modéliser la distribution historique à partir d'un modèle de GARCH(p, q) asymétrique semi-paramétrique comme Barone-Adesi et al. (2008). Nous discutons le choix de la spécification choisie par rapport à d'autres alternatives de modélisation des rendements des quotas de CO₂ dans la sous-section suivante. Notons tout d'abord que la méthodologie adoptée par Jackwerth (2000) n'est pas applicable, car la fréquence mensuelle utilisée dans ce papier conduirait à un nombre d'observations insuffisant pour notre étude. Ensuite, il apparaît utile de souligner que, contrairement à Rosenberg et Engle (2002) et Jackwerth (2000), nous utilisons des prix d'option d'horizon plus long, soit un horizon temporel d'investissement de 1.3 années pour

¹⁶Nous écartons l'utilisation de contrats non liquides tel que celui de maturité décembre 2007.

¹⁷Nous utilisons le marché d'actions comme cas de référence, car celui-ci a fait l'objet de très nombreux travaux de recherche dans la littérature financière. Nous n'avons pas (ou peu) trouvé de littérature académique pertinente concernant les marchés de matières premières ou des obligations à taux fixe.

présenter nos résultats¹⁸.

Le modèle estimé est :

$$r_t = \mu + \sigma_t \epsilon_t$$

$$\sigma_t^2 = \omega_0 + \omega_1 I_t + \alpha(r_{t-1} - \mu)^2 + \beta\sigma_{t-1}^2 + \delta \max(0, -(r_{t-1} - \mu))^2$$

avec $\epsilon_t \sim \mathcal{N}(0, 1)$. Si $\delta > 0$, nous avons $Cov(r_t - r_{t-1}, \sigma_{t-1}^2 - \sigma_{t-2}^2) < 0$ pour prendre en compte l'effet d'asymétrie, également appelé effet de levier en économie financière. Le modèle est estimé par Pseudo Maximum de Vraisemblance (PMV) sous l'hypothèse de rendements Gaussiens. Comme l'ont démontré Gouriéroux et al. (1984), l'estimation par PMV conduit à des estimations sans biais, même si la fonction de probabilité de distribution ne contient pas nécessairement la vraie distribution. Barone-Adesi et al. (2008) et Rosenberg et Engle (2002) ont aussi prouvé la robustesse de cette approche. La matrice de covariance des estimations est estimée par la matrice BHHH (voir Berndt et al. (1974)). Nous recouvrons ensuite les résidus estimés, et appliquons la méthode du bootstrap pour simuler des échantillons selon la maturité désirée. En utilisant ces rendements simulés, nous estimons la densité de la distribution historique conditionnelle avec le noyau de prix Gaussien suivant :

$$f(S) = \frac{\sum_j K\left(\frac{S_j - S}{h}\right) S}{\sum_j K\left(\frac{S_j - S}{h}\right)}. \quad (3.10)$$

Comme dans Jackwerth (2000), nous sélectionnons les paramètres suivants :

$$h = \frac{1.8\sigma}{\sqrt[5]{n}} \quad (3.11)$$

où S est le point de la valeur future du prix de l'actif sous-jacent, h la largeur du paramètre du noyau, σ l'écart-type des rendements de l'échantillon, et n le

¹⁸Comme l'expliquent Cont et da Fonseca (2002), cet horizon d'investissement a été identifié comme étant le plus approprié à notre base de données. Ce choix n'affecte pas la robustesse des résultats obtenus.

nombre d'observations. En utilisant cette méthode, nous cherchons à pallier la non-normalité des rendements des futures diagnostiquée dans la sous-section suivante. De cette façon, nos résultats ne sont pas affectés par une erreur dans l'hypothèse de la loi de distribution choisie. La sous-section suivante présente les résultats de notre stratégie d'estimation.

3.1.5 Résultats d'estimation et discussion

Cette sous-section présente tout d'abord notre base de données, puis les résultats d'estimation obtenus.

Base de données

La base de données contient des observations quotidiennes pour les contrats futures et les prix d'option échangés sur l'*European Climate Exchange* (ECX), qui est la plate-forme d'échanges de quotas de CO₂ la plus liquide en ce qui concerne les produits dérivés avec 86.5% du total des échanges de quotas enregistrés sur les places de marché.

Les données incluent des prix d'option Européens *plain vanilla* de clôture en € pour des maturités décembre 2008 et décembre 2009, échangés en fréquence quotidienne entre le 1er octobre 2006¹⁹ et le 23 novembre 2007. Les Tableaux 3.2 et 3.3 détaillent le nombre d'observations disponibles pour chaque contrat ainsi que le volume moyen pour chaque prix d'exercice de l'option dans la base de données²⁰. Les données relatives à la distribution risque-neutre couvrent un échantillon de 570 prix d'options pour le contrat de maturité décembre 2008, et 494 prix d'options pour le contrat de maturité décembre 2009. Avec 18 prix d'exercice par contrat, les échantillons totalisent respectivement 10260 et 8892 observations. La Figure 3.5 fournit une illustration des prix d'option disponibles en fonction de différents prix d'exercice.

¹⁹A savoir, lors du lancement de l'échange de produits dérivés sur ECX.

²⁰D'après le Tableau 3.3, le volume quotidien associé à chaque contrat n'est pas toujours disponible dans la base de données.

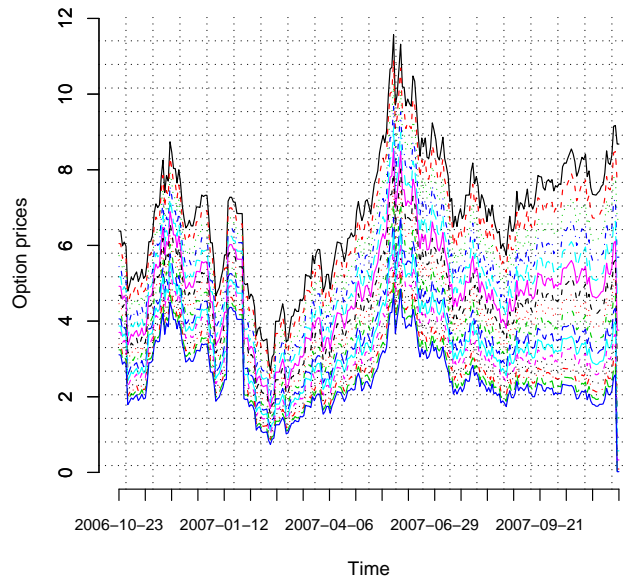


FIG. 3.5 – Prix d'options disponibles par prix d'exercice sur ECX

Les statistiques descriptives de chaque contrat peuvent être trouvées dans les Tableaux 3.4 et 3.5. Pour chaque contrat, le coefficient de dissymétrie négatif indique une queue de distribution asymétrique s'étendant vers des valeurs plus négatives. L'excès d'aplatissement suggère une queue de distribution empirique épaisse, et la présence d'observations extrêmes. D'après la statistique du test Jarque Berra, les résidus ne sont pas Gaussiens, ce qui est caractéristique des séries temporelles financières. La p-value de la statistique du test de Box Pierce indique que les résidus ne sont pas auto-corrélés. Dans le but de retirer des observations non fiables caractérisées par un faible volume d'échange et une faible sensibilité à la volatilité, nous considérons uniquement les options dont la *moneyness* est comprise entre 0.5 et 1.5.

De plus, nous utilisons des séries de prix futures échangés sur ECX pour des contrats de même maturité que ceux des prix d'option²¹. L'actif sous-jacent à ces

²¹De la même façon, le contrat de maturité décembre 2007 n'est pas inclus dans notre échantillon, car il contient moins d'observations et se révèle moins liquide.

contrats est un quota valide durant les Phases I et II. Le taux d'intérêt sans risque est le taux swap à un an en €, utilisé de façon courante par les agents financiers. Le choix des séries de prix futures à la place des prix spots a été motivé dans la section 3.2. La base de données concernant la distribution historique contient un échantillon de prix futures en fréquence quotidienne entre le 1er octobre 2006 et le 23 novembre 2007, c'est à dire plus de 400 observations par contrat.

D'après les Figures 3.6 et 3.7, une inspection visuelle des données révèle des changements brutaux dans les séries de prix futures en fonction de la période considérée, c'est à dire *avant* et *après* le résultat de conformité 2006. Des tests statistiques ont été conduits sur chaque série de prix futures prise en différence première logarithmique, et confirment la présence d'un changement structurel autour du 1er mars 2007²².

Sur la période allant du 1er octobre 2006 au 23 novembre 2007, nous choisissons de découper notre base de données *avant* et *après* l'évènement annuel de conformité imposé par la Commission Européenne, dans le but d'évaluer les changements dans les anticipations des investisseurs. Les installations doivent reporter d'ici la fin du mois de mars de chaque année les émissions vérifiées ayant trait à la période de conformité de l'année précédente. Par exemple, les émissions de CO₂ au niveau des installations durant l'année 2006 ont été reportées le 30 mars 2007. Ensuite, l'information devient publiquement disponible lorsque la Commission Européenne publie son rapport entre la fin du mois d'avril et la mi-mai. Dans le but de refléter cet évènement institutionnel, et de capturer l'état de l'information disponible aux opérateurs de marché avec le plus d'exactitude, nous divisons notre base de données en deux sous-échantillons, notés #1 et #2, à la date du 30 avril 2007, c'est à dire lorsque la Commission Européenne a publié son rapport officiel concernant la période de conformité 2006²³. Nous définissons l'échantillon #1 comme étant : "1er

²²Voir le détail des tests de racine unitaire avec changement structurel endogène de Lee et Strazicich (2001) dans le Chapitre 2.

²³Notons que le choix de la date de séparation des échantillons entre la fin mars et la fin avril n'affecte pas la stabilité des résultats. Ainsi, les résultats ne sont pas qualitativement différents si l'on élimine l'ensemble des dates où la structure d'information des agents n'est pas claire, c'est à dire mars-avril-mai.

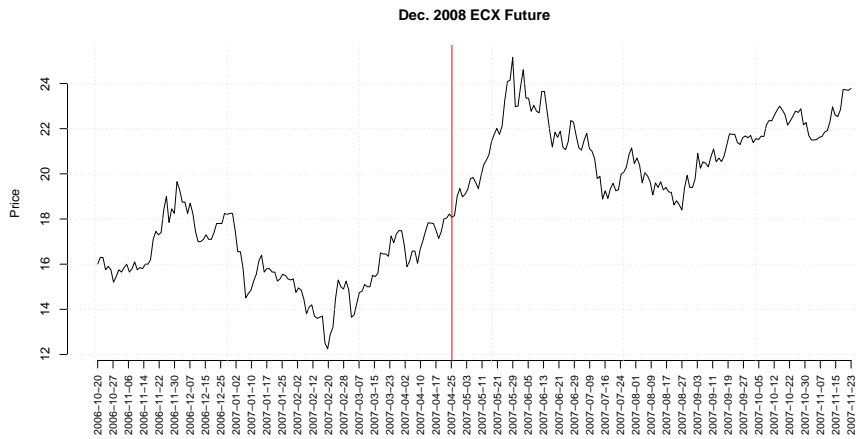


FIG. 3.6 – Prix historique pour le contrat futures de maturité décembre 2008 d'après ECX

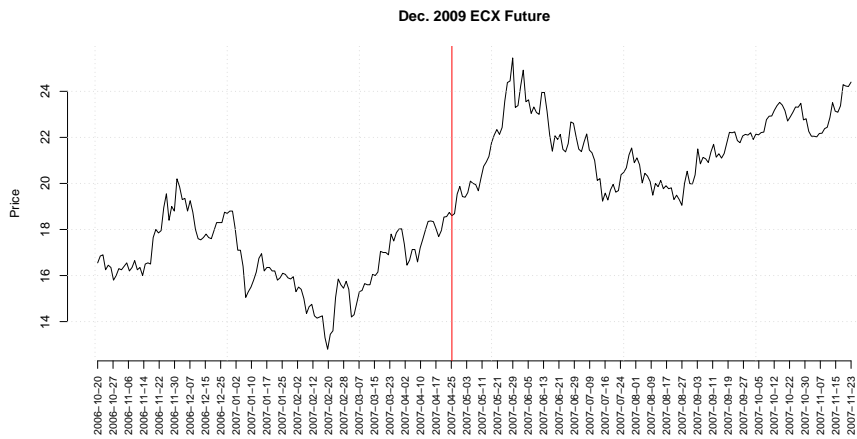


FIG. 3.7 – Prix historique pour le contrat futures de maturité décembre 2009 d'après ECX

octobre 2006-30 avril 2007". L'échantillon #2 est défini comme : "1er mai 2007-23 novembre 2007". Cette division en sous-échantillons est la même pour les deux contrats de maturité décembre 2008 et décembre 2009.

Pour chaque sous-période, nous supposons que les distributions risque-neutre et historique sont suffisamment stables²⁴ pour utiliser les prix des différents marchés, et inférer chacune d'entre elles. Cette méthode nous conduit à estimer l'aversion au risque moyenne pour chaque sous-période considérée²⁵. Enfin, nous choisissons d'appliquer à notre base de données une date moyenne de maturité $\tau = 1.3$ en fréquence annuelle²⁶.

Résultats d'estimation

Résumons brièvement la méthode d'estimation développée dans cette première section du Chapitre 3. Premièrement, la distribution risque-neutre est recouverte à partir des prix d'options ECX. Deuxièmement, la distribution historique est approximée par la distribution du rendement historique des séries de prix futures. Sur l'ensemble de la base de données allant du 1er octobre 2006 au 23 novembre 2007, nous estimons les probabilités risque-neutre et historique. Troisièmement, comme détaillé dans l'éq.(3.1), nous inférons à partir de ces distributions de probabilité la fonction d'aversion absolue au risque pour un investisseur représentatif, avec un horizon temporel d'investissement de 1.3 années.

Concernant la distribution de probabilité historique, les Tableaux 3.6 et 3.7 indiquent que la meilleure spécification est le modèle asymétrique GARCH(1,1)-GJR

²⁴Comme indiqué plus haut, pour les deux sous-échantillons considérés, nous avons conduit des tests de racine unitaire avec changement de structure endogène. Comme expliqué dans le Chapitre 2, ces tests s'appliquent sur la moyenne de la série temporelle utilisée. Nous en avons conclu qu'aucun changement de structure n'est décelable parmi chaque sous-échantillon.

²⁵Sur ce point, voir Rosenberg et Engle (2002).

²⁶Ce choix de date de maturité a été fait pour rendre les résultats comparables entre les contrats de maturité décembre 2008 et décembre 2009. Nous avons expérimenté avec d'autres valeurs de τ , et nos résultats sont restés qualitativement inchangés. Nous avons donc décidé de maintenir cette méthodologie de façon à simplifier la présentation des résultats. Notons que des valeurs plus faibles de τ ne doivent pas être utilisées, étant donnée la maturité moyenne des options contenues dans notre base de données.

pour prendre en compte l'effet de levier. Le résultat du test de ratio de vraisemblance confirme que le GARCH-GJR donne le meilleur résultat pour modéliser la distribution historique. Le modèle choisi est donc le GARCH-GJR de Glosten et al. (1993) que nous détaillons à nouveau ci-dessous :

$$\begin{aligned} r_t &= \mu + \sigma_t \epsilon_t \\ \sigma_t^2 &= \omega_0 + \omega_1 I_t + \alpha (r_{t-1} - \mu)^2 + \beta \sigma_{t-1}^2 + \delta \max(0, -(r_{t-1} - \mu))^2 \\ \epsilon_t &\sim \mathcal{N}(0, 1), \end{aligned}$$

avec r_t le rendement logarithmique à la période t et $I_t = 1$ si t se trouve dans le sous-échantillon #2 (*après* le résultat de conformité) et 0 dans le sous-échantillon #1 (*avant* le résultat de conformité). Nous sommes particulièrement intéressés par le fait que ω_1 soit statistiquement différent de zéro et *négatif* : le marché européen du carbone est caractérisé par *plus* de volatilité *avant* le résultat de conformité d'avril 2007 qu'après. Ce résultat est conforme à ce qui était attendu dans la section 3.2, à savoir que la révélation d'information réduit l'incertitude, et donc la volatilité sur les marchés financiers. Les Figures 3.8 et 3.9 reproduisent la volatilité historique pour les deux contrats futures estimés avec le modèle GARCH(1,1) asymétrique.

Nos estimations varient fortement vis-à-vis des résultats couramment obtenus sur les marchés boursiers. Premièrement, tandis que le terme constant ω_0 et le terme ARCH α sont plus élevés que les valeurs trouvées dans Rosenberg et Engle (2002) et Barone-Adesi et al. (2008), le terme GARCH β est systématiquement plus faible. Cependant, le degré de persistance de la variance conditionnelle, mesuré par $(\alpha + \beta)$, est proche des valeurs trouvées dans les articles précédemment cités. Deuxièmement, il est particulièrement intéressant de constater que le terme d'asymétrie δ est *négatif* : des périodes de prix *croissants* sur le marché de quotas de CO₂ coïncident avec des périodes de volatilité plus forte. Cette caractéristique croissante se trouve à l'opposé de l'effet de levier traditionnellement observé sur les marchés boursiers²⁷. Dans un contexte de faible contrainte environnementale sur

²⁷Rappelons que l'effet de levier implique un niveau de volatilité plus élevé associé à une période de prix *décroissants*.

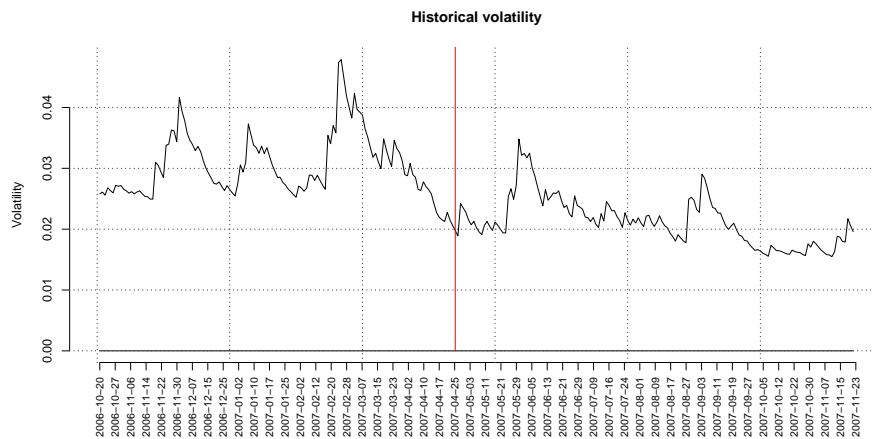


FIG. 3.8 – Volatilité historique estimée avec le modèle GARCH(1,1) asymétrique pour le contrat de maturité décembre 2008

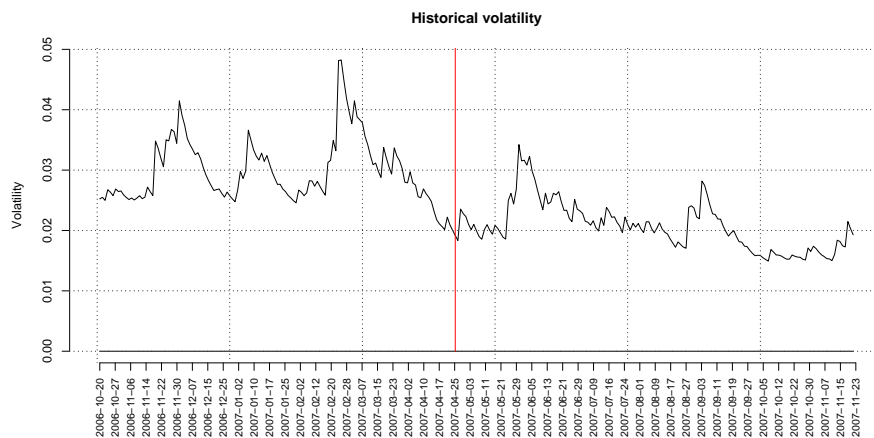


FIG. 3.9 – Volatilité historique estimée avec le modèle GARCH(1,1) asymétrique pour le contrat de maturité décembre 2009

le marché du carbone, le risque associé au contrat d'option consiste dans des prix *croissants* de quotas de CO₂ *après* l'évènement de conformité 2006, à l'inverse d'un marché standard de matière première²⁸. Au-delà de l'effet de la révélation d'information qui a conduit à une volatilité moyenne plus faible dans le sous-échantillon #2 où les prix sont globalement croissants, la volatilité durant les périodes de prix croissants a été plus élevée que durant les périodes de prix décroissants. Nous mettons donc en évidence deux effets différents de volatilité asymétrique, le premier dépendant de la révélation d'information, et le second étant une caractéristique nouvellement identifiée sur le marché émergent du carbone. Cependant, comme nous l'expliquons ci-dessous dans le commentaire de la volatilité implicite, le premier effet domine globalement le second.

La logique derrière le second effet peut être explicitée comme suit. Dans les Figures 3.10 et 3.11, les courbes de volatilités implicites ont des *smiles* de pente très différente selon le sous-échantillon considéré. Pour les deux contrats de maturité décembre 2008 et décembre 2009, le *smile* observé dans le sous-échantillon #1 (en bleu) est déformé vers la droite, ce qui suggère que les opérateurs de marché anticipaient une *baisse* du prix des quotas de CO₂ *avant* l'annonce de la vérification des émissions valables pour la période de conformité 2006. Pour le sous-échantillon #2 (en rouge), le *smile* présente une asymétrie vers la gauche, ce qui suggère que les opérateurs de marché anticipaient une *hausse* du prix des quotas de CO₂ *après* le résultat de conformité 2006. Notre commentaire des courbes de volatilité implicite s'explique en fonction du comportement des investisseurs sur le marché d'options. Quand les investisseurs anticipent une forte baisse de prix, ils achètent des options de vente avec des prix d'exercice plus faibles que l'actif sous-jacent, et vendent des options d'achat à des prix d'exercice plus élevés. Etant donné la relation unitaire entre les prix d'option et la volatilité implicite, ce comportement conduit à une faible volatilité implicite pour de faibles niveaux de *moneyness*, comparativement à des niveaux plus élevés. La volatilité implicite est donc plus

²⁸Cette logique est conforme à la déconnexion des prix de quotas de CO₂ entre les Phases I et II décrite précédemment, c'est à dire que les investisseurs anticipent des prix de quotas de CO₂ strictement croissants dans un contexte de plus grande fermeté dans l'allocation future.

faible pour des niveaux de *moneyness* strictement supérieurs à 1, indiquant ces tendances de prix décroissants. Autrement dit, pour tout point de l'actif, plus la volatilité implicite est faible, plus la probabilité d'occurrence de l'évènement est élevée. Cette relation est également utilisée pour commenter les changements dans la courbe de la distribution risque-neutre. Entre les deux contrats, notre analyse trouve un niveau de volatilité implicite de l'ordre de 0.8-0.9 pour le second contrat de maturité décembre 2009, ce qui est plus élevé que les valeurs trouvées pour le premier contrat de maturité décembre 2008 comprises entre 0.6-0.8. Ce résultat peut être expliqué par le fait que la date moyenne de maturité pour les prix d'option dans la base de données est plus grande pour le second contrat que pour le premier contrat.

Nous avons mis en évidence un profond changement dans les anticipations des investisseurs durant l'évènement de conformité 2006. Nous supposons que ce changement est néanmoins de plus faible ampleur que durant l'évènement de conformité 2005²⁹. Au mois d'avril 2007, la Commission Européenne a révélé que les émissions vérifiées étaient plus *faibles* que le nombre de quotas distribués de l'ordre de 30 millions de tonnes de CO₂, soit 1.45% de l'allocation 2006³⁰. D'après les résultats de notre analyse empirique, on peut argumenter que deux messages institutionnels bien distincts sont en fait inclus dans la diffusion de cette information par le régulateur. Premièrement, la Commission Européenne a confirmé que le nombre de quotas distribués a été plus élevé que le niveau effectif d'émissions de CO₂ pour la deuxième année consécutive. Cet élément permet d'expliquer pourquoi les acteurs de marché anticipaient une *baisse* du prix du quota *avant* l'évènement de conformité 2006. Deuxièmement, la Commission Européenne a révélé que les émissions vérifiées étaient plus faibles que le nombre de quotas distribués de l'ordre de 1.45% seulement durant la période de conformité 2006, ce qui correspond à un excès de quotas plus faible que lors de l'évènement de conformité 2005³¹. Ainsi, les agents

²⁹Comme indiqué précédemment, nous ne disposons pas de prix d'options à cette période pour capturer l'ampleur de cet évènement.

³⁰Voir le site de la Commission Européenne DG Environnement à l'adresse suivante : <http://ec.europa.eu/environment/press/index.htm>.

³¹Ellerman et Buchner (2008) évaluent que les émissions vérifiées étaient plus faibles que le

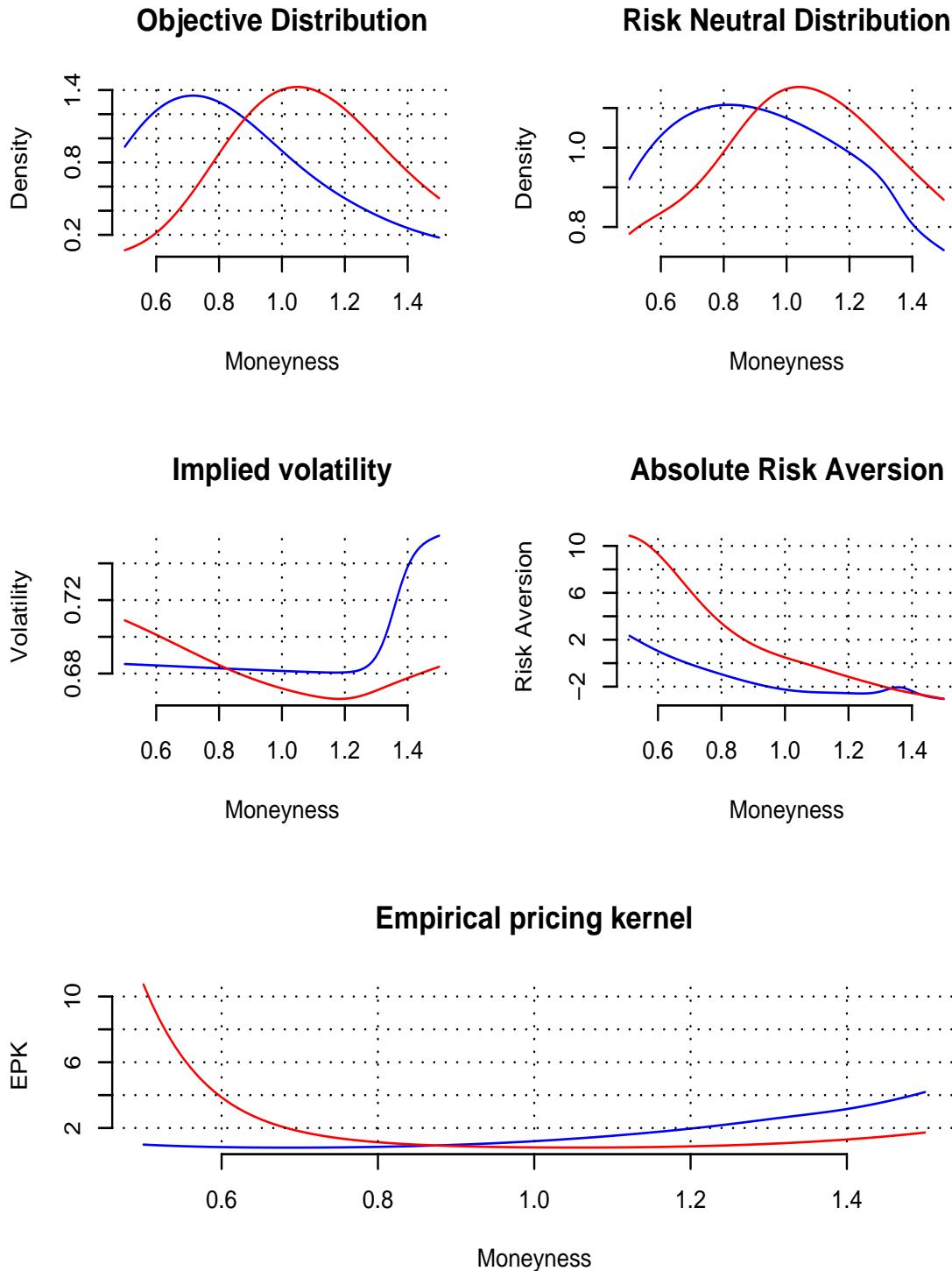


FIG. 3.10 – Résultats d'estimation pour le contrat de maturité décembre 2008 avec $\tau = 1.3$. La courbe bleue dénote le sous-échantillon #1. La courbe rouge dénote le sous-échantillon #2.

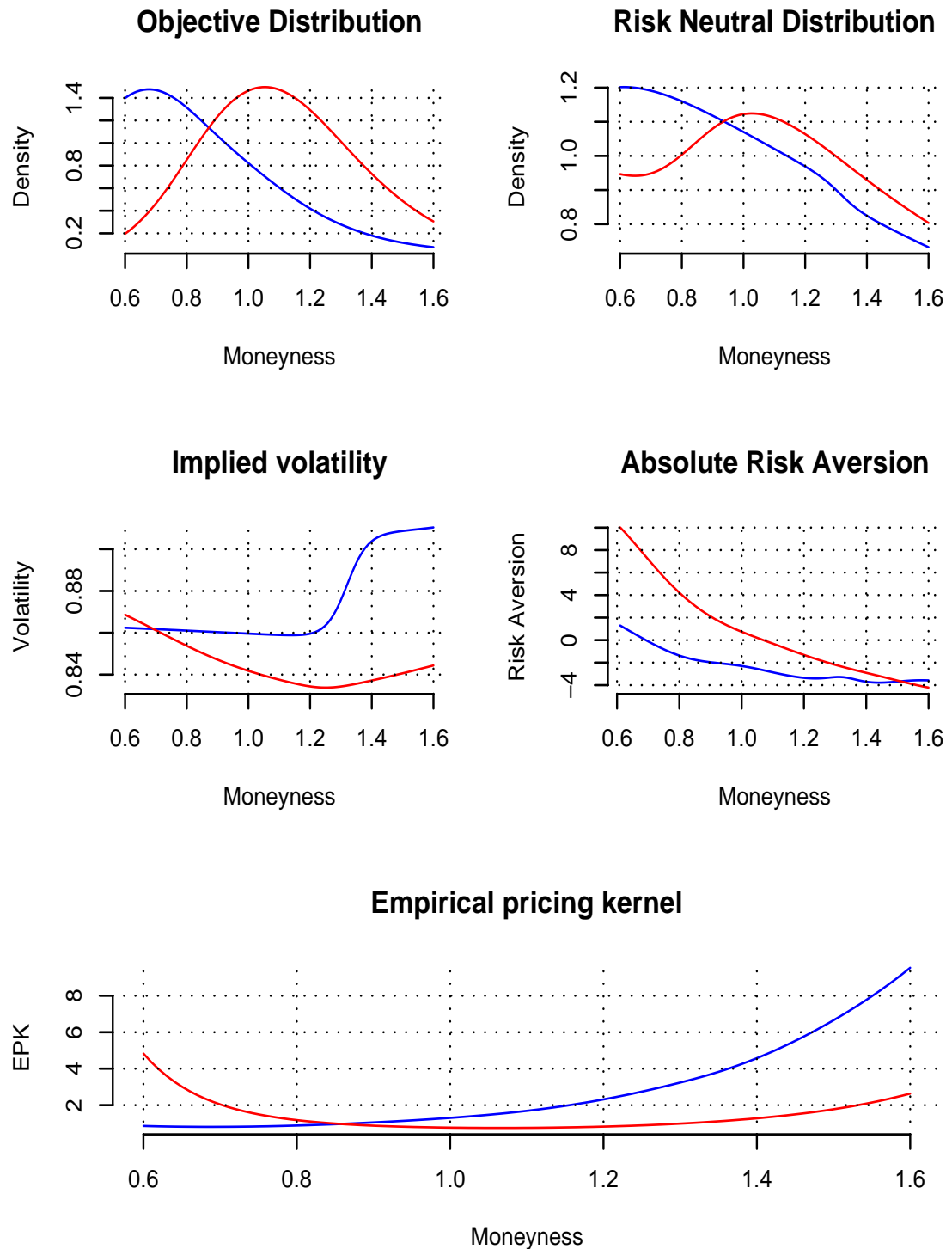


FIG. 3.11 – Résultats d'estimation pour le contrat de maturité décembre 2009 avec $\tau = 1.3$. La courbe bleue dénote le sous-échantillon #1. La courbe rouge dénote le sous-échantillon #2.

ont adapté leurs anticipations au risque d'être exposé à un déficit de quotas, ce qui peut expliquer pourquoi on observe une anticipation à la hausse du prix du quota *après* l'évènement de conformité 2006. De plus, nous avons détaillé dans la Section 3.2 que la structure par terme des séries de prix futures reflète les perspectives d'allocations plus restrictives par la Commission Européenne, ainsi que sa volonté de recourir à la mise aux enchères, ce qui influe positivement sur la rareté anticipée de quotas. Enfin, la décision de maintenir l'EU ETS au moins jusqu'en 2020 contribue à ce chemin de prix futures strictement croissants. De façon plus générale, les incertitudes substantielles liées aux émissions vérifiées durant l'année de conformité 2006 sont capturées par la volatilité. Principalement les prix d'options, et dans une moindre mesure les futures, sont des produits financiers qui réagissent fortement en fonction de la volatilité, et donc de l'incertitude. Il est établi que les prix d'options de vente et d'achat sont des fonctions croissantes de l'incertitude, même sur le marché du carbone. La relation entre les prix futures et l'incertitude est moins claire dans l'EU ETS. Nos résultats d'estimation révèlent néanmoins que les anticipations des investisseurs de prix strictement *croissants* du CO_2 sont correctement reflétées par la structure par terme des prix futures sur le moyen terme.

Les résultats obtenus pour les distributions risque-neutre et historique confirment nos intuitions. Rappelons que la distribution objective est la distribution relative aux séries temporelles des prix futures, tandis que la distribution risque-neutre est la densité de prix utilisée pour donner un prix juste à tout type d'actif. Concernant la distribution risque-neutre, dans les Figures 3.10 et 3.11, la courbe bleue, qui dénote la densité risque-neutre dans le sous-échantillon #1, a une pente plus forte que la courbe rouge pour le sous-échantillon #2, ce qui traduit une plus grande volatilité. Ces résultats sont conformes à ce qui était attendu, à savoir obtenir une plus *faible* volatilité implicite *après* l'annonce de la Commission Européenne. Les résultats de la densité historique conduisent aux mêmes asymétries que la densité risque-neutre pour les deux contrats de maturité décembre 2008 et décembre 2009. Nous avons montré que la diffusion d'information institutionnelle

nombre de quotas de CO_2 distribués de l'ordre de 3% durant la période de conformité 2005.

durant l'évènement de conformité 2006 diminue à la fois la volatilité historique et la volatilité implicite moyenne, et change la symétrie des courbes de volatilités implicites, des probabilités risque-neutre et historique.

Concentrons à présent notre attention sur l'aversion au risque. Rappelons que le noyau de prix est défini par $\frac{\hat{q}(x)}{\hat{f}(x)}$ pour tout point du support de l'actif. Le noyau de prix présente des formes singulières qui soulignent le fort changement dans l'aversion au risque sur le marché de quotas. Les Figures 3.10 et 3.11 illustrent clairement ce point : *avant* l'évènement annuel de conformité (sous-échantillon #1), les agents de marché anticipent une *baisse* du prix du quota, tandis qu'*après* l'évènement annuel de conformité (sous-échantillon #2) une *hausse* de prix est attendue. Le noyau de prix est contra-cyclique, c'est à dire qu'il est inversement lié aux tendances de marché. Le noyau de prix est décroissant dans un contexte de prix croissants et inversement, ainsi que l'ont montré Rosenberg et Engle (2002). Ces résultats peuvent être comparés à ceux obtenus sur les marchés d'actions dans des études utilisant les mêmes intervalles de maturité et de *moneyness*. Nous utilisons des prix d'option avec une date de maturité plus longue que Jackwerth (2000) et Rosenberg et Engle (2002), et nos intervalles de *moneyness* sont par conséquent plus larges que les leurs. Seuls Barone-Adesi et al. (2008) présentent des résultats empiriques avec des intervalles comparables de prix d'exercice et de maturité. Leurs estimations se situent sur une échelle allant de deux à cinq. Comme l'indiquent les Figures 3.10 et 3.11, nos estimations se situent sur une échelle allant de presque 0 à 10. Cette échelle considérablement plus grande dans nos estimations suggère que la pente du noyau de prix est plus forte dans notre étude. Ce résultat est particulièrement visible à des niveaux bas de *moneyness* dans le sous-échantillon #2 pour le contrat de maturité décembre 2008, et à des niveaux élevés de *moneyness* dans le sous-échantillon #1 pour le contrat de maturité décembre 2009. Des commentaires similaires s'appliquent aux courbes d'aversion pour le risque, où une forte pente du noyau de prix est associée à un niveau élevé d'aversion pour le risque. Sur la période considérée, on peut donc conclure que l'aversion au risque sur le marché de quotas de CO₂ est *plus élevée* que les valeurs trouvées traditionnellement sur les marchés d'actions. Ce résultat est cohérent avec la nécessité

d'adopter des stratégies de gestion des risques adaptées sur ce nouveau marché.

La structure de prix *croissants* observée dans les séries de prix futures *après* le résultat de conformité 2006 peut être interprétée comme l'intériorisation par les agents de nouvelles règles de fonctionnement du marché du carbone caractérisé par une allocation plus restrictive, et donc par une plus grande rareté de quotas de CO₂. Cette perspective est confirmée par plusieurs éléments. D'abord, l'EU ETS étant confirmé jusqu'en 2020, les opérateurs de marché peuvent tenir compte dans leurs plans d'investissements d'un prix du carbone de moyen-terme raisonnablement plus élevé qu'il ne l'a été durant 2005-2007. Ensuite, les investisseurs ont perçu à travers la révision de la Directive de l'EU ETS une volonté d'inclure plus d'industries énergie-intensives, tout en accroissant la part de la mise aux enchères de quotas. Ces éléments nous amènent logiquement à considérer plus en détails dans la deuxième section du Chapitre 3 comment les agents peuvent se prémunir contre le risque de changement des décisions politiques, et comment redistribuer des quotas pour partager ce risque.

3.2 Stockage de quotas en incertitude et règle optimale de partage des risques : théorie et évidence empirique

Les permis d'émissions négociables sont généralement considérés comme un instrument performant pour obtenir une régulation de la pollution par les firmes. Leurs avantages sont nombreux et largement décrits par la littérature (Bohm et Russel (1985), Pearce et Turner (1990), Cropper et Oates (1992), Koutstaal (1997), Baumol et Oates (1998)). Néanmoins, ils sont porteurs d'incertitude quant aux décisions politiques qu'ils impliquent. Dans le cas classique d'une taxe, l'incertitude politique porte sur le montant de la taxe. Dans le cas des permis, l'incertitude porte non seulement sur le prix des permis par le jeu du marché, mais aussi sur le nombre total de permis distribués et les règles d'allocation choisies par le

régulateur. L'argument informationnel ³² en faveur des permis par rapport aux autres instruments classiques³³ est à tempérer, compte tenu de l'incertitude plus grande pour les firmes concernant le risque de variation des décisions politiques³⁴. Face à ces incertitudes politiques, un certain nombre de firmes peuvent exprimer leur réticence à participer au marché de permis, et leurs craintes par rapport à un système de régulation environnementale trop soumis aux aléas politiques (Wossink et Gardebroek (2006)). Hahn (1989) fut l'un des premiers à souligner les effets négatifs des incertitudes politiques sur un marché de permis. Cet auteur souligne que les avantages des permis en terme de contrôle de la pollution peuvent être annulés par les incertitudes politiques liées aux mécanismes d'échange spatial et inter-temporel de permis. D'autres auteurs, tels que Leston (1992), Stavins (1995) ou encore Ben-David *et al.* (1999), ont souligné que la performance économique et environnementale des marchés de permis est liée en grande partie à la clarté des options politiques.

Dans cette deuxième section, nous analysons, dans un cadre d'équilibre partiel, les décisions de production des firmes soumises à la mise en place d'un marché de permis, sachant que les firmes ont la possibilité de stocker des permis d'une période à l'autre. Au début de chaque période, les firmes reçoivent une dotation de permis. En considérant le cas d'absence d'incertitude sur l'allocation future de permis comme référence, la firme lisse son utilisation de permis entre les périodes en fonction des dotations de chaque période (Rubin (1996), Kling et Rubin (1997), Leiby et Rubin (2001))³⁵. Par rapport à ce cas de référence, l'introduction d'une incertitude sur l'allocation future peut inciter les firmes à stocker des permis et donc à réduire leurs émissions. Ce comportement lié au stockage change le profit temporel des émissions en diminuant la concentration des émissions de polluants en période initiale³⁶. En lien avec le Chapitre 1, on peut donc affirmer que l'autorisation du stockage apparaît comme un critère déterminant pour le succès de la mise

³²C'est à dire, besoin de moins d'informations sur les coûts de dépollution des firmes.

³³Telles que les taxes ou les subventions.

³⁴Que ce soit concernant l'allocation globale des permis ou la répartition entre firmes.

³⁵Voir le Chapitre 1 pour plus de détails.

³⁶Ce comportement s'applique particulièrement aux firmes ayant des coûts d'abattement élevés.

en place d'un marché de permis. A partir de ce cas de référence, l'introduction de l'incertitude fournit aux firmes des incitations supplémentaires à stocker des permis, et permet de considérer la collusion comme une forme d'assurance (Von der Fehr (1993), Ehrhart et al. (2008))³⁷.

Nous étudions dans cette section les questions centrales suivantes : une augmentation de l'incertitude sur l'allocation future a-t-elle un effet *positif* ou *négatif* sur le comportement de stockage des firmes ? suite à une variation du niveau d'incertitude, existe-t-il une règle optimale de partage des risques entre les firmes ? Nous concentrons notre analyse sur le rôle des mécanismes de stockage, et supposons que l'échange de permis a déjà eu lieu entre firmes.

Par rapport à la littérature existante, les principaux résultats théoriques de cette section se résument en trois points. Premièrement, nous montrons que quand les firmes sont confrontées à une augmentation du niveau de risque, la variation du nombre de permis stockés est liée à la dérivée tierce de la fonction de production par rapport aux émissions. Deuxièmement, si la fonction de production est à facteurs de production complémentaires (substituables), les firmes accroissent (décroissent) leur consommation d'inputs en réponse à cette augmentation du niveau de risque. Troisièmement, en l'absence d'incertitude sur le montant total de permis distribués durant la seconde période, une agence peut introduire une ré-allocation de permis Pareto optimale entre firmes. Quand l'incertitude politique concerne le nombre de permis disponibles durant la seconde période, une règle optimale de partage des risques doit prendre en compte la sensibilité de la productivité marginale des firmes par rapport au nombre de permis, ainsi que l'élasticité de la productivité marginale par rapport au stock de pollution. Enfin, nous fournissons une discussion empirique de ces résultats en examinant le comportement de stockage au niveau des installations, et le comportement de mutualisation des permis au niveau de la maison mère dans le contexte de l'EU ETS. Nous confirmons l'impact des différentes règles d'allocation et de l'incertitude politique sur la variation du nombre de permis stockés par les firmes, ainsi que l'existence de

³⁷La collusion peut avoir plusieurs impacts sur un marché de permis. Voir les articles précédemment mentionnés pour une discussion.

stratégies de couverture des risques par les maisons mères de façon à économiser les coûts de pénalité et d'achats de permis. Ces résultats soulignent également la nécessité de prendre en compte la sensibilité des investisseurs vis-à-vis des choix de pollution (Etner et Jovet (2000)).

Cette section est organisée de la manière suivante. La Section 3.2.2 est consacrée à l'analyse du comportement de la firme. La Section 3.2.3 s'intéresse à la mutualisation des risques, propose une règle optimale de partage des risques et discute les implications en terme de politique environnementale. La Section 3.2.4 apporte une discussion empirique.

3.2.1 Comportement de la firme

Nous analysons dans cette sous-section le comportement d'une firme prenant ses décisions de production sur deux périodes. Nous choisissons de concentrer notre propos sur l'effet de l'incertitude sur le comportement de stockage des firmes. Par conséquent, nous supposons que l'échange de permis entre firmes a déjà eu lieu. En première période t , la firme obtient une dotation de permis \bar{P}_t . Cette dotation peut être utilisée pour la production, ou stockée pour la période suivante. En seconde période, la firme obtient une allocation de permis \bar{P}_{t+1} .

A chaque période, la firme produit un bien à partir d'une technologie de production employant un input X_t ³⁸ et des permis, P_t . Par conséquent, à partir de la mise en place des permis à la date t , la firme, en plus d'utiliser une quantité d'input X_t , utilise de l'environnement en quantité P_t , pour produire une quantité de bien Y_t :

$$Y_t = F(X_t, P_t) \tag{3.12}$$

La quantité d'environnement P_t indique simplement le nombre de permis demandé par la firme pour produire et couvrir ses émissions de polluants. Nous retenons les propriétés suivantes pour la fonction de production : elle est stricte-

³⁸ X_t peut être considéré comme un vecteur d'inputs, c'est à dire $X_t = \{X_t^1, \dots, X_t^k\}$ avec $k \geq 1$. Pour simplifier la présentation, nous considérons le cas où $k = 1$.

ment concave en chacun de ses arguments, et ses dérivées secondes non croisées sont négatives ($F_{ii} < 0$).

Comportement de la firme en absence d'incertitude

La firme maximise son profit intertemporel en fonction de ses inputs X_t et X_{t+1} , et du choix d'utilisation des permis P_t et P_{t+1} . On note S_t le stock de permis résultant de la différence entre la dotation initiale de permis allouée à la firme et le nombre de permis qu'elle utilise³⁹, $S_t = \bar{P}_t - P_t$. En seconde période, la firme utilise en plus de sa dotation le stock de permis constitué lors de la période précédente. En considérant β le facteur d'actualisation de la firme, son profit intertemporel est défini par :

$$\Pi_t = \pi_t + \beta\pi_{t+1}$$

avec $\pi_t = F(X_t, P_t) - R_t X_t$ et $\pi_{t+1} = F(X_{t+1}, P_{t+1}) - R_{t+1} X_{t+1} + q_{t+1}(\bar{P}_{t+1} + S_t - P_{t+1})$ avec R_t et R_{t+1} les prix des inputs, q_t et q_{t+1} les prix des permis.

Le programme de la firme s'écrit :

$$\max_{X_t, X_{t+1}, S_t \geq 0, P_t, P_{t+1}} \left\{ \begin{array}{l} F(X_t, P_t) - R_t X_t \\ + \beta \{ F(X_{t+1}, P_{t+1}) - R_{t+1} X_{t+1} + q_{t+1}(\bar{P}_{t+1} + S_t - P_{t+1}) \} \end{array} \right\}$$

Avec $P_t = \bar{P}_t - S_t$, les conditions de premier ordre sont :

$$F_{X_t}(X_t, P_t) = R_t \quad (3.13)$$

$$F_{X_{t+1}}(X_{t+1}, P_{t+1}) = R_{t+1} \quad (3.14)$$

$$F_{P_t}(X_t, P_t) - \beta q_{t+1} \leq 0 ; = 0 \text{ si } S_t > 0 \quad (3.15)$$

³⁹Dans cet article, nous nous intéressons uniquement à la possibilité de stockage, soit un niveau S_t non négatif. Le cas $S_t < 0$ correspondrait à une dette en permis de la part de la firme. Comme indiqué dans le Chapitre 1, le fait de relâcher la contrainte de non-négativité sur l'emprunt de permis ne change pas qualitativement les résultats obtenus.

$$F_{P_{t+1}}(X_{t+1}, P_{t+1}) - q_{t+1} = 0 \quad (3.16)$$

La condition (3.15) indique que la firme utilisera effectivement la possibilité de stockage des permis si le coût marginal du stockage est inférieur au prix anticipé des permis. En combinant les relations (3.15) et (3.16), nous obtenons :

$$F_{P_t}(X_t, P_t) = \beta F_{P_{t+1}}(X_{t+1}, P_{t+1}) \quad (3.17)$$

Les relations (3.13), (3.14) et (3.17) décrivent les effets d'une variation du nombre de permis distribués en première ou seconde période sur la décision de stockage de la firme. Il en découle que le stockage est une fonction croissante de l'allocation de première période, $dS_t/d\bar{P}_t > 0$, et décroissante de l'allocation de seconde période, $dS_t/d\bar{P}_{t+1} < 0$. Lorsque le nombre de permis distribués en première période augmente, la firme a la possibilité d'augmenter à la fois son stock et le nombre de permis utilisés, lui permettant d'augmenter sa production courante et sa production future. Suite à une augmentation de nombre de permis distribués en seconde période, la firme peut augmenter sa production en première période en stockant moins, et en seconde période en utilisant plus de permis.

Suite à la présentation du modèle de base de notre analyse, nous introduisons l'incertitude sur l'allocation des permis en seconde période.

Comportement de la firme en présence d'incertitude

Nous supposons à présent que l'allocation de seconde période est aléatoire⁴⁰, \tilde{P}_{t+1} , avec une probabilité de distribution $G(\cdot)$. L'aspect aléatoire reflète le fait que les règles d'allocation des permis peuvent être modifiées par le régulateur, ce qui a des effets sur l'allocation de seconde période. L'allocation de permis en seconde période ne sera connue par la firme qu'en début de seconde période. Aussi, à la date $t + 1$, la firme connaîtra le montant \hat{P}_{t+1} de permis qui lui sera distribué, et pourra effectuer son choix d'utilisation d'inputs, et les niveaux de production et d'émissions de polluants correspondants. Néanmoins, à la date t , ce montant n'est

⁴⁰Nous notons une variable aléatoire avec $\tilde{\cdot}$.

pas connu avec certitude. Nous supposons que la firme anticipe un montant moyen de permis égal à \bar{P}_{t+1} .

En situation d'incertitude sur l'allocation de seconde période le profit intertemporel, $E \Pi_t = \pi_t + \beta E \pi_{t+1}$, s'écrit :

$$\Pi_t = \left\{ \begin{array}{c} F(X_t, P_t) - R_t X_t \\ + \beta E \left\{ F(X_{t+1}, P_{t+1}) - R_{t+1} X_{t+1} + q_{t+1} (\tilde{P}_{t+1} + S_t - P_{t+1}) \right\} \end{array} \right\}$$

Le choix de la firme se fait alors en deux temps. Dans un premier temps, la firme choisit S_t et X_t en considérant une incertitude sur le montant des permis futurs. Dans un second temps, elle choisit X_{t+1} et P_{t+1} étant donnés ses choix de première période. Ce programme se résoud en deux étapes.

Choix de X_{t+1} et P_{t+1} à S_t et \hat{P}_{t+1} donnés :

$$\max_{X_{t+1}, P_{t+1}} \left\{ \pi_{t+1} = \beta \left\{ F(X_{t+1}, P_{t+1}) - R_{t+1} X_{t+1} + q_{t+1} (\hat{P}_{t+1} + S_t - P_{t+1}) \right\} \right\}$$

Les conditions de premier ordre sont :

$$F_{X_{t+1}} - R_{t+1} = 0 \quad (3.18)$$

et

$$F_{P_{t+1}} - q_{t+1} = 0 \quad (3.19)$$

A la période t , l'eq.(3.19) implique l'eq.(3.19)' :

$$q_{t+1} = E F_{P_{t+1}}$$

Nous obtenons alors un niveau de profit de seconde période, $\tilde{\pi}_{t+1}^*$ fonction de la dotation en permis \hat{P}_{t+1} et du stock S_t :

$$\begin{aligned} \tilde{\pi}_{t+1}^*(\hat{P}_{t+1}) &= F(X_{t+1}^*(\hat{P}_{t+1}, S_t), P_{t+1}^*(\hat{P}_{t+1}, S_t)) - R_{t+1} X_{t+1}^*(\hat{P}_{t+1}, S_t) \\ &\quad + q_{t+1} (\hat{P}_{t+1} + S_t - P_{t+1}^*(\hat{P}_{t+1}, S_t)) \end{aligned}$$

Choix de X_t et S_t en présence d'une dotation aléatoire de permis, \tilde{P}_{t+1} :

$$\max_{X_t, S_t} \left\{ F(X_t, \bar{P}_t - S_t) - R_t X_t + \beta E \left\{ \tilde{\pi}_{t+1}^* (\tilde{P}_{t+1}) \right\} \right\}$$

En utilisant (3.19)', les conditions d'optimalité sont :

$$F_{X_t} = R_t \quad (3.20)$$

$$-F_{P_t}(X_t, \bar{P}_t - S_t) + \beta E F_{P_{t+1}}(X_{t+1}, \tilde{P}_{t+1} + S_t) = 0 \quad (3.21)$$

Nous obtenons en espérance une condition similaire au cas sans incertitude. Sans variation du niveau d'incertitude, le comportement de la firme est simplement basé sur son espérance de profit. Nous nous interrogeons sur les conséquences d'un changement du niveau de risque quant à l'allocation de seconde période. Pour ce faire, nous allons considérer une augmentation du risque au sens de Rothschild et Stiglitz (1971), et étudier les effets de ce changement dans la probabilité de distribution sur le comportement de stockage et de consommation d'inputs de la firme. Nous obtenons la caractérisation suivante des effets d'une variation du risque sur la variable de stock S :

Proposition 1 *A un niveau donné d'inputs, en réponse à une augmentation du risque préservant la moyenne, le stockage des permis par la firme est une fonction croissante (décroissante) du risque si et seulement si la dérivée tierce de la fonction de production par rapport aux émissions, F_{PPP} , est positive (négative).*

Proof. Considérons un niveau donné d'inputs, X_t^* , X_{t+1}^* , à partir de l'eq.(3.21) avec une distribution de probabilité, $G(\cdot)$. Nous obtenons :

$$-F_{P_t}(X_t^*, \bar{P}_t - S_t^G) + \beta E_G F_{P_{t+1}}(X_{t+1}^*, \tilde{P}_{t+1} + S_t^G) = 0 \equiv H^G(S_t^G)$$

Considérons une distribution de probabilité $K(\cdot)$, où $K(\cdot)$ est un changement dans la probabilité de distribution préservant la moyenne de $G(\cdot)$. L'eq.(3.21) donne :

$$-F_{P_t}(X_t^*, \bar{P}_t - S_t^K) + \beta E_K F_{P_{t+1}}(X_{t+1}^*, \tilde{P}_{t+1} + S_t^K) = 0 \equiv H^K(S_t^K)$$

En utilisant la condition du second ordre du programme d'optimisation, nous avons $S_t^K > S_t^G$ si et seulement si $H^K(S_t^K) > H^G(S_t^G)$ (Rothschild et Stiglitz (1971)).

Ainsi, $S_t^K > S_t^G$ si et seulement si :

$$E^K h(S_t^K) > E^G h(S_t^G)$$

où $h(S) = F_{P_{t+1}}(X_{t+1}^*, \tilde{P}_{t+1} + S)$. Cette inégalité est vérifiée si et seulement si $h(S)$ est convexe :

$$h'(S) = F_{P_{t+1}P_{t+1}}$$

et

$$h''(S) = F_{P_{t+1}P_{t+1}P_{t+1}}$$

■

Les conditions sur la dérivée tierce de la fonction de production par rapport aux émissions renvoient en définitive à l'étude de la concavité de cette fonction. L'intuition derrière ce résultat peut être résumée de la façon suivante :

Lorsqu'elles sont confrontées à un accroissement plus fort (faible) de leur productivité marginale, les firmes ont tendance à utiliser moins (plus) de permis, et donc sont capables de produire et de stocker plus (moins) de permis.

Nous venons de voir dans cette sous-section que les variations en termes de choix d'inputs et de stock de permis par la firme dépendent des caractéristiques de la productivité marginale en terme de concavité. Des firmes, ayant des caractéristiques différentes sur leur dérivée tierce, vont alors avoir des comportements opposés en terme de stockage de permis. Dans la sous-section suivante, nous cherchons si des firmes hétérogènes peuvent mutualiser leur risque par l'intermédiaire d'une agence de gestion des permis. Si une telle option s'avère envisageable, nous explorons ensuite quelle pourrait être la règle optimale de partage des risques entre firmes.

3.2.2 Les stratégies de gestion des risques

Examinons dans un premier temps le comportement de mutualisation des risques, et dans un second temps la règle optimale de partage des risques entre les firmes.

La mutualisation des risques

Pour étudier la règle de partage des risques, nous allons supposer, dans un cadre d'équilibre partiel, qu'il existe N firmes et Θ états de la nature⁴¹. On note $\bar{P}_{t+1}^{i\theta}$ la dotation en permis que reçoit la firme i dans l'état de la nature θ , $0 \leq \theta \leq \Theta$, qui se réalise avec la probabilité μ_θ . Le programme d'une firme de type i s'écrit alors :

$$\max_{X_t, X_{t+1}, S_t, P_{t+1}} \left\{ \begin{array}{l} F^i(X_t^i, \bar{P}_t^i - S_t^i) - R_t X_t^i \\ + \beta \sum_{\theta=0}^{\Theta} \mu_\theta \{ F^i(X_{t+1}^i, P_{t+1}^i) - R_{t+1} X_{t+1}^i + q_{t+1} (\bar{P}_{t+1}^{i\theta} + S_t^i - P_{t+1}^i) \} \end{array} \right\}$$

Une mutualisation des risques implique l'introduction d'une agence de coopération⁴² entre les firmes chargée de maximiser la somme des profits des firmes quels que soient les états de la nature. Cette agence prend en compte la somme des dotations des firmes sur les deux périodes :

$$\sum_i^N \bar{P}_t^i = \sum_i P_t^i + S_t \quad (3.22)$$

et

$$\sum_i \bar{P}_{t+1}^{i\theta} + S_t = \sum_i P_{t+1}^{i\theta}, \quad \forall \theta \in \Theta \quad (3.23)$$

En substituant S_t dans les contraintes (3.22) et (3.23), nous obtenons la contrainte suivante pour l'agence :

⁴¹En considérant un cadre d'équilibre partiel, nous supposons que les N firmes constituent un sous ensemble des firmes soumises au marché des permis.

⁴²Cette agence peut correspondre soit à une "maison mère" avec N filiales, soit à une centralisation des décisions de production. Cette forme de mutualisation correspond à celle couramment utilisée dans le cadre des mutuelles d'assurance pour les consommateurs (voir Gollier (2001)).

$$\sum_i [\bar{P}_t^i + \bar{P}_{t+1}^{i\theta}] = \sum_i P_t^i + \sum_i P_{t+1}^{i\theta} \equiv \bar{P}^\theta, \forall \theta \in \Theta \quad (3.24)$$

Le programme de l'agence est donc de maximiser la somme des profits en choisissant les niveaux d'inputs des firmes (X_t^i et $X_{t+1}^{i\theta}$), ainsi que les niveaux d'utilisation des permis (P_t^i et $P_{t+1}^{i\theta}$) pour tous les états de la nature. Sachant que l'ensemble des ventes de permis doit être égal à l'ensemble des achats, et en prenant en compte l'ensemble des profits des firmes, le programme de l'agence s'écrit :

$$\max_{\{X_t^i, X_{t+1}^{i\theta}, P_t^i, P_{t+1}^{i\theta}\}_{i,\theta}} \sum_i \left\{ \begin{array}{l} F^i(X_t^i, P_t^i) - R_t X_t^i \\ + \beta \sum_{\theta=0}^{\Theta} \mu_\theta \{ F^i(X_{t+1}^{i\theta}, P_{t+1}^{i\theta}) - R_{t+1} X_{t+1}^{i\theta} \} \end{array} \right\}$$

sous la contrainte (3.24). En notant λ_θ le multiplicateur de Lagrange de la contrainte dans l'état θ , nous obtenons les conditions de premier ordre suivantes pour tout i et quel que soit $\theta \in [0, \Theta]$:

$$F_{X_t^i}^i(X_t^i, P_t^i) = R_t \quad (3.25)$$

$$F_{X_{t+1}^{i\theta}}^i(X_{t+1}^{i\theta}, P_{t+1}^{i\theta}) = R_{t+1} \quad (3.26)$$

$$F_{P_t^i}^i(X_t^i, P_t^i) = \sum_{\theta} \lambda_\theta \quad (3.27)$$

$$\beta \mu_\theta F_{P_{t+1}^{i\theta}}^i(X_{t+1}^{i\theta}, P_{t+1}^{i\theta}) = \lambda_\theta \quad (3.28)$$

et

$$\lambda_\theta \left\{ \sum_i [\bar{P}_t^i + \bar{P}_{t+1}^{i\theta}] - \sum_i P_t^i - \sum_i P_{t+1}^{i\theta} \right\} = 0 \quad (3.29)$$

Nous déterminons la condition de Borch appliquée aux firmes, et retrouvons le principe de mutualité. A l'optimum, les taux marginaux de substitution technique des firmes i et j entre deux états de la nature, θ_1 et θ_2 , sont égaux :

$$\frac{F_{P_{t+1}^{i\theta_1}}^i(X_{t+1}^{i\theta_1}, P_{t+1}^{i\theta_1})}{F_{P_{t+1}^{i\theta_2}}^i(X_{t+1}^{i\theta_2}, P_{t+1}^{i\theta_2})} = \frac{F_{P_{t+1}^{j\theta_1}}^j(X_{t+1}^{j\theta_1}, P_{t+1}^{j\theta_1})}{F_{P_{t+1}^{j\theta_2}}^j(X_{t+1}^{j\theta_2}, P_{t+1}^{j\theta_2})} \quad \forall i, j, \theta_1, \theta_2 \quad (3.30)$$

Cette condition est analogue à celle de Borch (1962) sur les taux marginaux de substitution des agents entre deux états de la nature.

A partir des conditions d'optimalité ((3.25) à (3.29)), et en conservant la condition de Borch, nous obtenons une fonction implicite $\Gamma^{i\theta}$ entre le nombre de permis distribués à chaque firme dans un état de la nature, et les dotations globales de permis dans chacun de ces états. Nous pouvons alors énoncer le principe de mutualité suivant :

$$P_{t+1}^{i\theta} = \Gamma^{i\theta}(\bar{P}^1, \bar{P}^2, \dots, \bar{P}^\theta, \dots, \bar{P}^\Theta) \quad (3.31)$$

Par conséquent, les permis distribués par l'agence dépendent de la somme agrégée de l'ensemble des permis disponibles dans l'économie sur les deux périodes. En cas d'une modification des règles d'allocation des permis entre les firmes, et sans incertitude sur le montant total des permis distribués durant la seconde période, nous obtenons le résultat suivant :

Quelles que soient les décisions du régulateur en terme de critère d'allocations de permis aux firmes en seconde période, la ré-allocation par l'agence est Pareto optimale pour les firmes.

Ce comportement de mutualisation contraste fortement avec la situation de "laissez faire" examinée dans la section 3.2.2. L'espérance de profit des firmes est identique au cas d'absence d'incertitude à partir du moment où l'agence redistribue l'ensemble des permis dans l'économie. En connaissant simplement le montant global de permis à chaque période, $\bar{\bar{P}}_t = \sum_i \bar{P}_t^i$ et $\bar{\bar{P}}_{t+1} = \sum_i \bar{P}_{t+1}^i$, l'agence va pouvoir redistribuer l'ensemble des permis, $\bar{\bar{P}}_t + \bar{\bar{P}}_{t+1}$, sur chaque période quelles que soient les modifications de règle d'allocation souhaitées par le régulateur. Dans ce cas, l'agence peut effectuer un lissage des permis sur les deux périodes en lieu et place des firmes. En respectant la condition de Borch, cette allocation est Pareto optimale. En revanche, comme nous allons le voir dans la sous-section suivante, si l'aléa porte sur le montant total de permis distribués en seconde période, alors

l'agence de mutualisation peut seulement proposer une règle optimale de partage des risques liée aux permis.

Règle de partage optimale des risques

Pour un état de la nature donné, θ , nous déduisons de l'éq.(3.30) l'égalité des productivités marginales des permis entre les firmes :

$$F_{P_{t+1}^{i\theta}}^i(X_{t+1}^{i\theta}, P_{t+1}^{i\theta}) = F_{P_{t+1}^{j\theta}}^j(X_{t+1}^{j\theta}, P_{t+1}^{j\theta}) \quad (3.32)$$

En utilisant la relation (3.26), les inputs X de seconde période peuvent être exprimés comme des fonctions des permis de seconde période :

$$X_{t+1}^{i\theta} = \Phi^i(P_{t+1}^{i\theta}) \quad (3.33)$$

En introduisant ces fonctions dans la relation (3.32), nous obtenons une relation entre les dotations finales des permis des firmes prises deux à deux :

$$F_{P_{t+1}^{i\theta}}^i(\Phi^i(P_{t+1}^{i\theta}), P_{t+1}^{i\theta}) - F_{P_{t+1}^{j\theta}}^j(\Phi^j(P_{t+1}^{j\theta}), P_{t+1}^{j\theta}) = 0 \quad (3.34)$$

Afin de préciser la règle optimale de partage des risques, nous étudions les variations d'allocation des permis des différentes firmes en fonction des variations du stock de permis de seconde période. Pour ce faire, nous considérons la contrainte (3.24) d'allocation des permis dans deux états de la nature θ_1 et θ_2 :

$$\sum_i [\bar{P}_t^i + \bar{P}_{t+1}^{i\theta_1}] = \sum_i P_t^i + \sum_i P_{t+1}^{i\theta_1} \quad (3.35)$$

et

$$\sum_i [\bar{P}_t^i + \bar{P}_{t+1}^{i\theta_2}] = \sum_i P_t^i + \sum_i P_{t+1}^{i\theta_2} \quad (3.36)$$

Avec $\bar{\bar{P}}_{t+1}^{\theta_1} = \sum_i \bar{P}_{t+1}^{i\theta_1}$ et $\bar{\bar{P}}_{t+1}^{\theta_2} = \sum_i \bar{P}_{t+1}^{i\theta_2}$, les dotations totales dans chaque état de la nature, nous obtenons :

$$\bar{\bar{P}}_{t+1}^{\theta_1} - \bar{\bar{P}}_{t+1}^{\theta_2} = \sum_i P_{t+1}^{i\theta_1} - \sum_i P_{t+1}^{i\theta_2} \quad (3.37)$$

En utilisant la relation (3.34) et le théorème des fonctions implicites, nous pouvons définir, pour tout état de la nature, une relation, $g(\cdot)$, entre les allocations des permis en seconde période des firmes prises deux à deux. Pour tout couple de firmes, i et j , nous avons :

$$P_{t+1}^{i\theta} = g_{ij}^{\theta}(P_{t+1}^{j\theta}) \quad (3.38)$$

En utilisant les relations (3.37) et (3.38), nous obtenons :

$$\frac{dP_{t+1}^{j\theta}}{d\bar{P}_{t+1}^{\theta}} = \frac{1}{\sum_i g_{ij}^{\theta}(P_{t+1}^{j\theta})} \quad (3.39)$$

avec

$$g_{ij}^{\theta}(P_{t+1}^{j\theta}) = \frac{\partial F_P^j / \partial P}{\partial F_P^i / \partial P}$$

Notons σ_j^{θ} l'élasticité de la productivité marginale de la variable environnementale de la fonction de production d'une firme i par rapport à une variation du nombre de permis :

$$\sigma_j^{\theta} = P \times \frac{\partial F_P^j / \partial P}{\partial F_P^j / \partial P},$$

Nous obtenons la proposition suivante :

Proposition 2 *Si le stock total de permis de seconde période est aléatoire, toute règle optimale de partage des risques entre les firmes vérifie :*

$$\frac{dP_{t+1}^{j\theta}}{d\bar{P}_{t+1}^{\theta}} = \frac{\sigma_j^{\theta} / P_{t+1}^{j\theta}}{\sum_i \sigma_i^{\theta} / P_{t+1}^{i\theta}}$$

Par conséquent, lorsque la dotation initiale globale des permis dans l'état θ augmente, la dotation finale de permis de seconde période dans cet état augmente proportionnellement à l'élasticité de la productivité marginale vis-à-vis de la variable environnementale (le stock de pollution). Cette condition de partage tient compte de la sensibilité de la productivité marginale de la firme au nombre de permis.

Implications en terme de politique environnementale

Les implications de ces résultats théoriques en terme de politique environnementale doivent être analysées en conjonction avec les propriétés du stockage sur un marché de permis, que nous avons détaillées dans le Chapitre 1. Il est important de rappeler que le stockage de quotas n'est pas nécessairement socialement efficient, et peut introduire des sources d'inefficiences. Dans cette section, nous nous concentrons sur les propriétés du stockage de permis en tant qu'outil de gestion des risques, qui a attiré moins d'attention dans la littérature précédente.

Nous pouvons déduire de la Proposition 1 que le régulateur devrait s'efforcer de réduire, voire éliminer, l'incertitude sur un marché de permis. Plus précisément, la tâche du régulateur consiste à annoncer et faire respecter la conformité avec des plafonds d'émission stricts. Si l'incertitude intervient concernant les changements des règles d'allocation, les firmes peuvent utiliser le stockage pour limiter le risque lié à l'échange de permis. En absence d'engagement crédible⁴³ du régulateur concernant les plafonds d'émissions pour les futures périodes, le stockage apparaît donc comme un outil adéquat pour contrôler le risque lié à la politique environnementale.

De plus, la Proposition 2 soulève la question de la création d'une agence au niveau *sectoriel*, étant donné qu'une telle institution apparaît manquante d'après notre analyse entre les niveaux du gouvernement et de la firme. Une agence serait utile pour mutualiser les permis provenant de firmes avec des caractéristiques technologiques différentes. Cela peut être compris comme une "assurance" institutionnelle contre la variation des décisions politiques sur un marché de permis.

Après avoir détaillé en Section 3.2.2 les conséquences de la prise en compte de l'incertitude sur le comportement de stockage de permis par les firmes, et en Section 3.2.3 la logique de mutualisation des risques entre les firmes, nous examinons dans la sous-section suivante si ces résultats théoriques sont conformes au comportement des firmes dans l'EU ETS.

⁴³Nous pouvons nous référer ici à la notion de cohérence temporelle des politiques publiques, appliquée au cas de l'échange de permis. Voir Biglaiser et al. (1995) et Helm et al. (2003) pour une discussion.

3.2.3 Evidence empirique

Cette sous-section se base sur le récent développement de l'EU ETS sur la période 2005-2007 pour inscrire dans une perspective empirique les principaux résultats théoriques. L'expérience récente du marché européen du carbone nous permet de détailler (i) les comportements de stockage de permis au niveau des installations comme détaillé dans la Section 3.2.2, et (ii) le comportement de mutualisation des permis au niveau de la maison mère comme détaillé dans la Section 3.2.3.

Nous utilisons la base de données *Reuters Carbon Market Data*⁴⁴ pour apporter une discussion qualitative des résultats théoriques. A partir des 800 entreprises incluses dans cette base de données, nous identifions sept firmes qui nous permettent de distinguer des comportements différents en terme de stockage et de mutualisation des permis. Nos études de cas se divisent en trois sous-échantillons : les firmes ayant les plus importants déficits de quotas au niveau de la maison mère, les firmes ayant les plus importants surplus de quotas au niveau de la maison mère, et la firme émettant le plus de CO₂ sur le marché. Nous concentrons notre analyse sur le nombre de quotas stockés au niveau de l'installation, et sur le comportement présumé de mutualisation des permis au niveau de la maison mère tel que nous l'avons détaillé, respectivement, dans les Sections 3.2.2 et 3.2.3.

Le comportement de stockage au niveau de l'installation

Dans l'EU ETS, l'incertitude politique concernant l'allocation de permis de seconde période est liée à la négociation des PNAQs II, tel que nous l'avons expliqué dans les Chapitres 1 et 2. Cette situation semble particulièrement adaptée au cadre théorique développé dans la Section 3.2.2. L'incertitude concerne le montant exact de permis devant être distribués sur la période 2008-2012, étant donné la volonté de la Commission Européenne d'introduire des règles d'allocations de quotas de CO₂ plus restrictives durant la Phase II.

⁴⁴ Accessible à l'adresse suivante : <http://www.carbonmarketdata.com>. Nous exploitons la compilation entre filiales et maisons mères des émissions vérifiées sur la période 2005-2007 à partir de la version de mai 2008 de la base de données *Reuters Carbon Market Data*.

La variation du nombre de quotas stockés par les firmes entre la Phase I (2005-2007) et la Phase II (2008-2012) correspond au résultat de la période de conformité 2008, qui ne sera annoncé publiquement par la Commission Européenne que vers la mi-mai 2009⁴⁵. En l'absence de ces données, nous choisissons de concentrer notre analyse sur la variation du nombre de quotas stockés par les firmes liée à la variation de l'incertitude politique sur la période 2005-2007. Par de nombreux aspects, nous avons vu que la Phase I peut être considérée comme une période d'essai où de nombreuses caractéristiques clefs⁴⁶ au succès de l'implémentation d'un marché de quotas ont fait l'objet de soudains changements de décision. Ce choix nous permet donc de discuter les résultats théoriques développés dans la sous-section précédente dans une perspective cohérente avec le développement de l'EU ETS au cours de la Phase I.

L'incertitude politique peut conduire la firme dans une situation où son niveau d'émissions (basé sur des projections historiques) excède son allocation pour la période de conformité en cours. Dans cette situation, la firme peut alors soit utiliser des permis stockés, soit acheter des permis sur le marché.

Etant donné l'hypothèse posée dans la Section 3.2.2 selon laquelle l'échange de quotas a déjà eu lieu entre firmes, nous concentrons notre attention sur le nombre de quotas stockés par les installations. Dans le cadre de l'incertitude politique qui caractérise l'EU ETS sur la période 2005-2007, les comportements de stockage sont très différents parmi les sept firmes que contient notre échantillon. Dans le sous-échantillon de firmes qui comptabilisent les *surplus* de quotas les plus élevés, nous observons naturellement un stockage net pour les installations les plus importantes en terme d'allocation chez ArcelorMittal (Figures 3.10 à 3.12, Tableau 3.8, voir l'Annexe C) et Dalkia (Figures 3.13 à 3.15, Tableaux 3.9 à 3.11), ainsi que pour l'installation d'Eesti Energia (Figures 3.16 à 3.18, Tableau 3.12). Ce commentaire semble particulièrement adapté aux installations dans le secteur électrique. Dans le sous-échantillon de firmes qui comptabilisent les *déficits* de quotas les plus élevés, nous remarquons des comportements asymétriques de stockage (emprunts)

⁴⁵De plus, comme nous l'avons expliqué en détails dans le Chapitre 1, le transfert de permis stockés entre les Phases I et II a été strictement limité par tous les Etats-Membres.

⁴⁶Telles que les règles d'allocation ou les mécanismes de stockage.

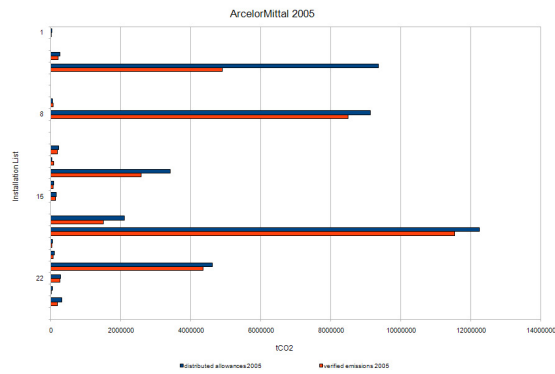


FIG. 3.12 – Quotas distribués et émissions vérifiées pour ArcelorMittal en 2005 d’après Reuters Carbon Market Data

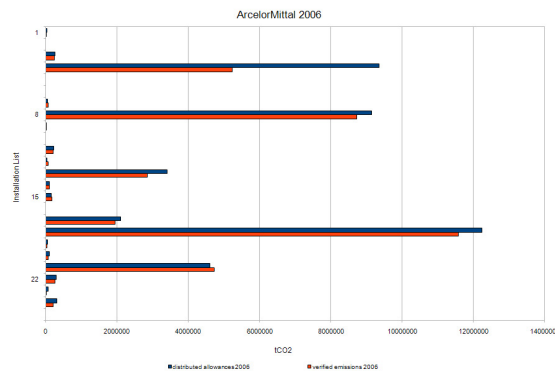


FIG. 3.13 – Quotas distribués et émissions vérifiées pour ArcelorMittal en 2006 d’après Reuters Carbon Market Data

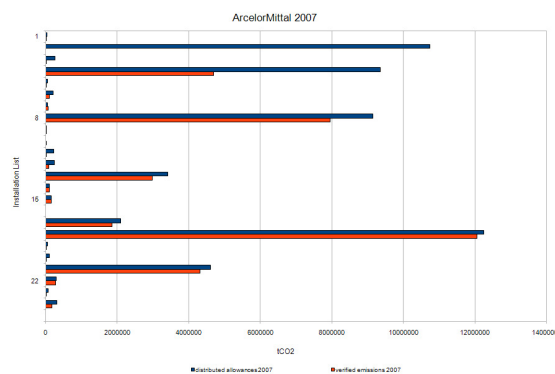


FIG. 3.14 – Quotas distribués et émissions vérifiées pour ArcelorMittal en 2007 d’après Reuters Carbon Market Data

de quotas chez Enel (Figures 3.19 à 3.21, Tableau 3.12), E.ON (Figures 3.22 à 3.24, Tableau 3.13 et 3.14) et Union Fenosa (Figures 3.28 à 3.30, Tableau 3.17) selon que ces installations étaient caractérisées par une position nette longue (courte) sur la période 2005-2007. Le même commentaire s'applique à notre troisième sous-échantillon qui concerne RWE, le plus important émetteur de CO₂ sur le marché (Figures 3.25 à 3.27, Tableaux 3.15 et 3.16).

L'inspection visuelle des données a révélé une forte variation dans le montant des quotas stockés au niveau des installations durant 2005-2007. Trois types d'arguments peuvent être avancés pour expliquer ces variations entre firmes. Premièrement, des règles d'allocation différenciées ont été instaurées par le régulateur entre les secteurs de l'EU ETS, ce qui affecte l'offre de quotas des firmes. Deuxièmement, on peut s'attendre à des effets non-anticipés au niveau de l'activité économique des firmes venant impacter leur niveau de production, et donc leur demande de quotas. Troisièmement, ces comportements hétérogènes de stockage de quotas peuvent s'expliquer par l'incertitude politique concernant les possibilités de flexibilité intertemporelle, et la négociation des PNAQs II. Ce dernier argument est conforme au cadre théorique développé dans les Sections 3.2.2 et 3.2.3 concernant les effets de l'incertitude politique sur le comportement de stockage des firme. Dans la sous-section suivante, nous procédons à une analyse plus détaillée de la répartition des surplus (déficits) de quotas entre installations par la maison mère.

3.2.4 Le comportement de mutualisation du risque lié à l'échange de quotas au niveau de la maison mère

Nous développons dans cette sous-section la logique économique sous-jacente à la mutualisation des risques entre firmes, puis nous nous intéressons aux comportements observables des firmes contenues dans notre échantillon. Nous avons avancé dans le Chapitre 2 l'hypothèse de mutualisation des risques liés à l'échange de quotas entre firmes au sein d'un même secteur de façon à justifier la non-significativité de certains résultats. Les Sections 3.2.2 et 3.2.3 nous ont ensuite permis d'obtenir des résultats théoriques expliquant ce comportement des firmes. Étant donné les délais dans la connexion entre les registres des Etats-Membres et le registre

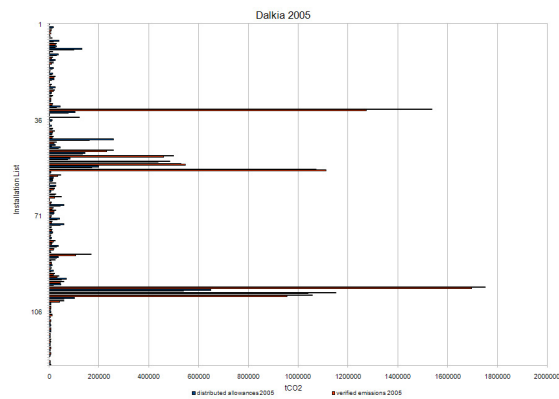


FIG. 3.15 – Quotas distribués et émissions vérifiées pour Dalkia en 2005 d'après Reuters Carbon Market Data

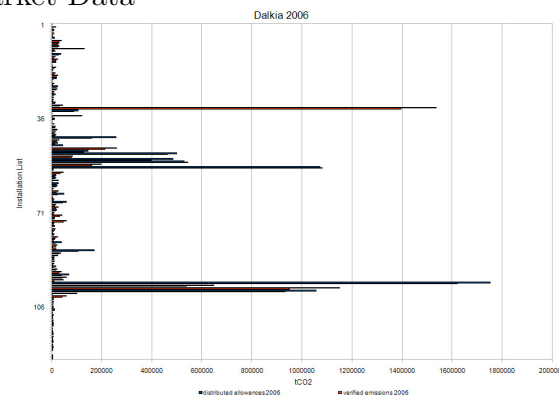


FIG. 3.16 – Quotas distribués et émissions vérifiées pour Dalkia en 2006 d'après Reuters Carbon Market Data

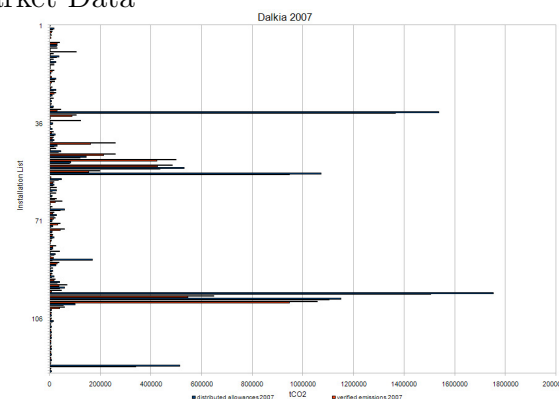


FIG. 3.17 – Quotas distribués et émissions vérifiées pour Dalkia en 2007 d'après Reuters Carbon Market Data

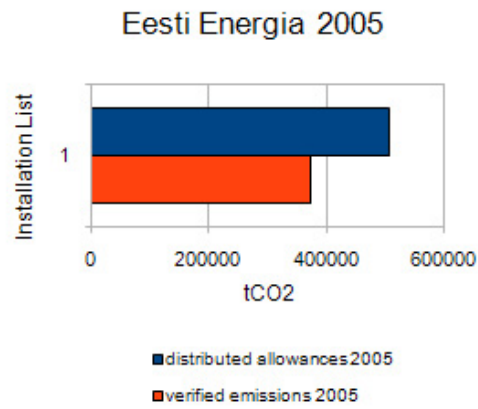


FIG. 3.18 – Quotas distribués et émissions vérifiées pour Eesti Energia en 2005 d'après Reuters Carbon Market Data

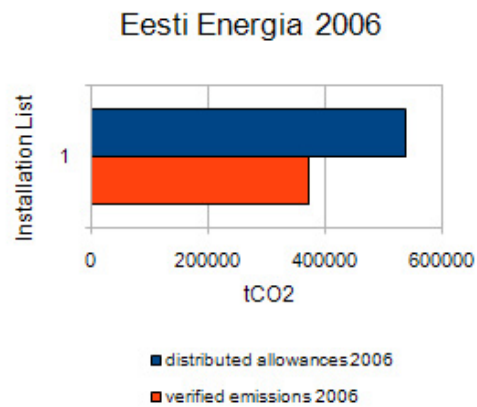


FIG. 3.19 – Quotas distribués et émissions vérifiées pour Eesti Energia en 2006 d'après Reuters Carbon Market Data

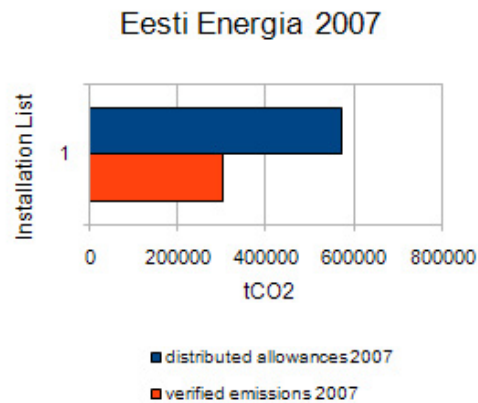


FIG. 3.20 – Quotas distribués et émissions vérifiées pour Eesti Energia en 2007 d'après Reuters Carbon Market Data

européen de gestion des quotas d'une part, et la nécessaire réorganisation des émissions vérifiées entre filiales et maison mère⁴⁷ sur la période 2005-2007 d'autre part, nous empruntons une approche purement descriptive, de façon à contextualiser dans le cadre de l'EU ETS les résultats théoriques obtenus dans les Sections 3.2.2 et 3.2.3.

Dans l'EU ETS, le comportement de mutualisation des risques s'explique par la volonté de la maison mère d'économiser les coûts relatifs à l'achat de quotas. La logique économique est la suivante : s'il existe des filiales ayant des positions nettes à la fois courtes et longues, la maison mère peut transférer des quotas entre elles en interne de façon à ce que la position nette de la maison mère soit globalement en conformité. L'exposition au risque de se retrouver dans une situation de déficit de quotas se trouve donc réduite par cette réallocation intra-firme. Ce type de comportement a été explicité formellement dans la Section 3.2.3 lorsque nous avons détaillé le rôle de l'agence de gestion des quotas. Cette logique s'applique au cas de l'EU ETS si et seulement si la maison mère est caractérisée par une distribution de filiales avec une alternance de positions nettes courte et longue. Dans ce qui suit, nous détaillons différents cas de figure.

Parmi les trois firmes de notre échantillon qui sont une position nette courte, Union Fenosa enregistre dans le Tableau 3.17 le déficit de quotas le plus élevé, égal à 7.3M EUAs en 2007. Sur douze installations, neuf se trouvent dans une position nette courte, ce qui ne peut être compensé en interne que par deux millions EUAs qui étaient en surplus. Le comportement de mutualisation des quotas par la maison mère réduit le risque d'exposition à un déficit de quotas de l'ordre de 25% pour certaines de ses filiales, mais pas toutes. L'inspection visuelle des données dans les Figures 3.28 à 3.30 révèle que trois installations sont en effet dans une position nette particulièrement courte durant 2005-2007. Ensuite, nous nous intéressons au cas d'E.ON qui enregistre dans les Tableaux 3.13 et 3.14 une position nette

⁴⁷Pour une analyse détaillée de cette compilation des données sur les émissions au niveau des maisons mères, se reporter à Trotignon et McGuinness (2007) et Trotignon et al. (2008). Notons qu'il n'est pas possible d'observer géographiquement les échanges de permis au niveau européen, bien que techniquement chaque permis soit identifié par un unique identifiant, car cette information est rendue publique cinq ans seulement après la mise en place de l'EU ETS.

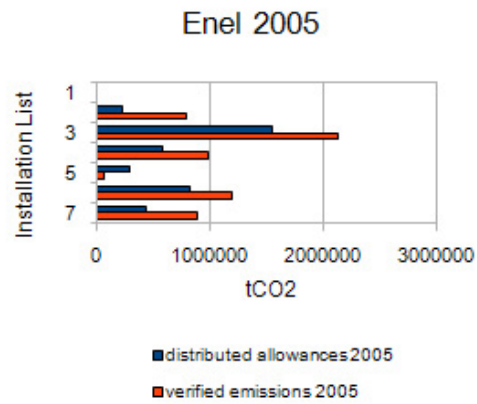


FIG. 3.21 – Quotas distribués et émissions vérifiées pour Enel en 2005 d'après Reuters Carbon Market Data

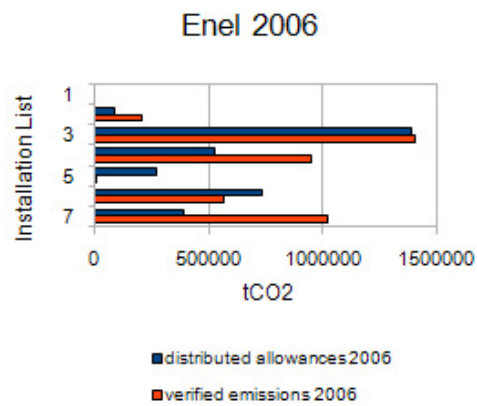


FIG. 3.22 – Quotas distribués et émissions vérifiées pour Enel en 2006 d'après Reuters Carbon Market Data

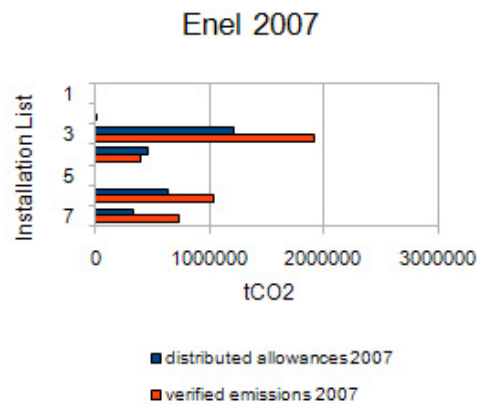


FIG. 3.23 – Quotas distribués et émissions vérifiées pour Enel en 2007 d'après Reuters Carbon Market Data

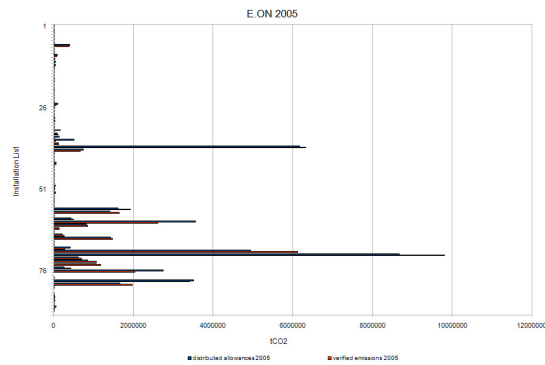


FIG. 3.24 – Quotas distribués et émissions vérifiées pour Eon en 2005 d'après Reuters Carbon Market Data

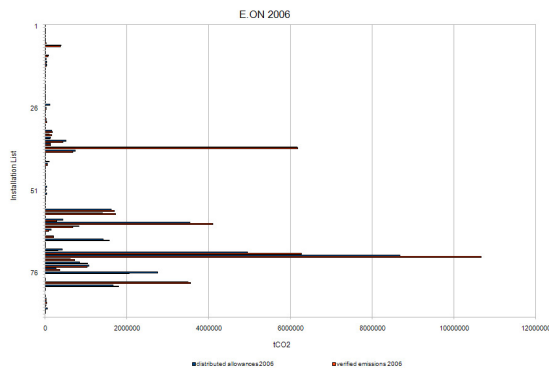


FIG. 3.25 – Quotas distribués et émissions vérifiées pour Eon en 2006 d'après Reuters Carbon Market Data

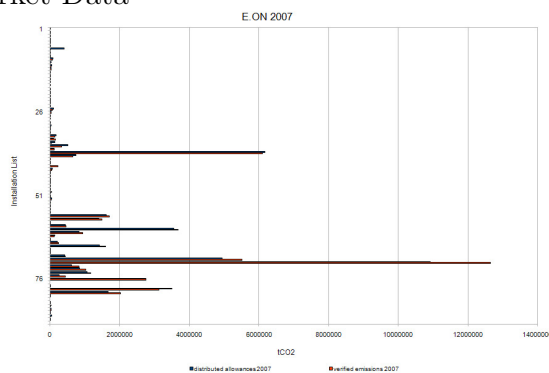


FIG. 3.26 – Quotas distribués et émissions vérifiées pour Eon en 2007 d'après Reuters Carbon Market Data

courte de 2.7M EUAs. 31 parmi 89 installations sont caractérisées par un déficit de quotas, et le transfert de surplus potentiels provenant d'autres installations équivaut à 1.6M EUAs. La mutualisation des quotas par la maison mère permet d'économiser 60% du coût d'achat de quotas sur le marché. Dans les Figures 3.22 à 3.24, la distribution des filiales révèle une forte dispersion en terme de taille. Nous remarquons qu'une installation ayant reçu plus d'un million de quotas enregistre systématiquement une position nette courte durant 2005-2007. Enfin, d'après le Tableau 3.12, Enel enregistre un déficit net de quotas de l'ordre de 1.5M en 2007. Cinq parmi ses neuf installations sont dans une position nette courte, ce qui peut être compensé par d'autres filiales à hauteur de 0.05M EUAs. Les Figures 3.19 à 3.21 confirment cette analyse : la plupart des installations sont en déficit de quotas en 2007, ce qui fait de la firme un acheteur net de quotas sur le marché. Notre analyse du sous-échantillon de firmes avec les déficits de permis les plus élevés a confirmé le potentiel de partage des risques et de mutualisation des quotas au niveau de la maison mère, ce qui constitue l'un des principaux résultats de la Section 3.2.3.

Parmi les trois firmes de notre échantillon qui sont une position nette longue, ArcelorMittal dispose du surplus de quotas le plus élevé égal à 18.9M EUAs durant l'année de conformité 2007 (voir le Tableau 3.8). Le potentiel de transfert entre filiales apparaît faible. Seulement deux parmi trente-cinq installations sont dans une position courte, ce qui peut être contrebalancé par une réallocation de permis venant d'autres installations de la maison mère. Cette situation est confirmée par l'inspection visuelle des données dans les Figures 3.10 à 3.12. La maison mère est vendeuse nette de permis sur le marché. D'après les Tableaux 3.9 à 3.11, Dalkia enregistre un surplus élevé de quotas égal à 2.4M EUAs en 2007. Quatre parmi cent vingt cinq installations sont dans une position nette courte, ce qui suppose de façon similaire que leur déficit peut être facilement compensé en interne par la maison mère, couvrant ainsi le risque d'être dans une situation nette courte pour ses filiales. Dans les Figures 3.13 à 3.15, nous observons que la distribution des installations est très hétérogène, avec deux installations au-delà d'un million de quotas distribués qui enregistrent des surplus élevés. A une moindre échelle,

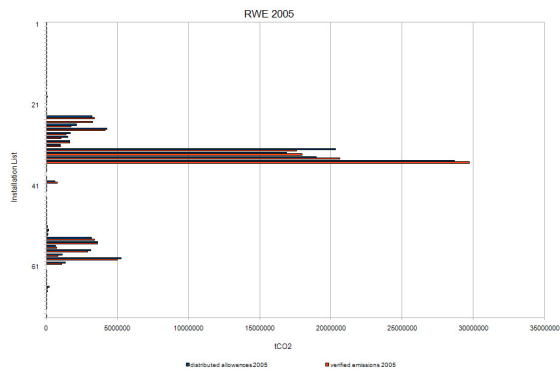


FIG. 3.27 – Quotas distribués et émissions vérifiées pour RWE en 2005 d’après Reuters Carbon Market Data

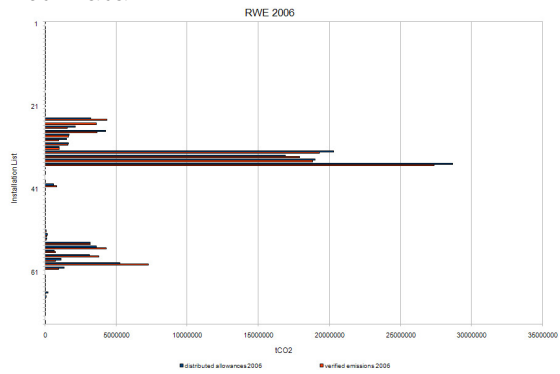


FIG. 3.28 – Quotas distribués et émissions vérifiées pour RWE en 2006 d’après Reuters Carbon Market Data

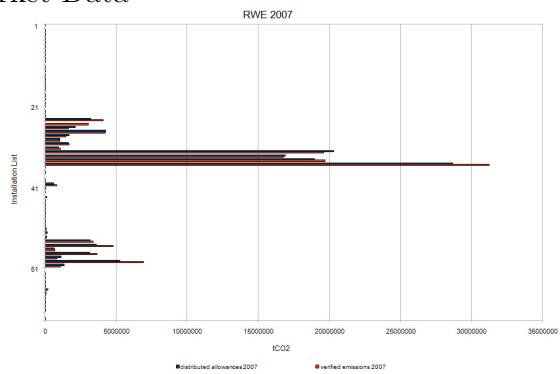


FIG. 3.29 – Quotas distribués et émissions vérifiées pour RWE en 2007 d’après Reuters Carbon Market Data

Eesti Energia enregistre dans le Tableau 3.12 une position nette longue de 0.27M EUAs en 2007 pour la seule installation figurant dans la base de données. Sans commenter plus avant la possibilité de transfert, les Figures 3.16 à 3.18 révèlent que le surplus de quotas a augmenté entre 2005 et 2007. Ce second sous-échantillon de firmes a donc confirmé la liquidité du marché en terme de quotas en surplus disponibles à l'échange. Etant donné la forte hétérogénéité de firmes, si certaines maisons mères sont toujours dans une situation nette courte après avoir transféré les quotas entre filiales, elles peuvent aisément recourir au marché pour assurer leur position de conformité.

Enfin, nous commentons le cas de RWE, qui est le plus important émetteur de CO₂ sur le marché avec 128M EUAs d'émissions vérifiées en 2007. D'après les Tableaux 3.15 et 3.16, nous observons que RWE enregistre une position nette *courte* de 8.6M EUAs. 21 parmi 73 installations sont dans une situation de déficit de quotas, ce qui ne peut être compensé en interne par la maison mère qu'à hauteur de 2.8M EUAs, soit 33% du montant total de quotas en déficit. La distribution des installations dans les Figures 3.25 à 3.27 révèle que RWE est composé de très larges installations, dont quatre ont reçu une allocation supérieure à 1.5M EUAs en 2007. Une installation ayant reçu plus de 2M EUAs en 2007 enregistre un *déficit* net de quotas⁴⁸.

Dans cette deuxième section, nous avons détaillé le comportement des firmes en présence d'incertitudes politiques sur les marchés de permis négociables, liées notamment aux variations des décisions du régulateur concernant notamment l'allocation. Notre analyse théorique a souligné le rôle essentiel joué par le comportement de stockage par la firme en tant qu'outil de gestion des risques, et de la mutualisation des risques liés à l'échange de quotas par une agence, permettant de partager optimalement ce risque. Notre discussion empirique a validé dans le contexte de l'EU ETS ces stratégies de gestion des risques, en mettant en évidence le comportement de stockage au niveau des installations, et celui de répartition

⁴⁸Cette analyse complète l'explication du rôle important joué par les producteurs d'électricité allemands dans l'EU ETS, que nous avons développée dans la Section 2.3 du Chapitre 2, en appui du signe *négatif* obtenu pour la variable *combde*.

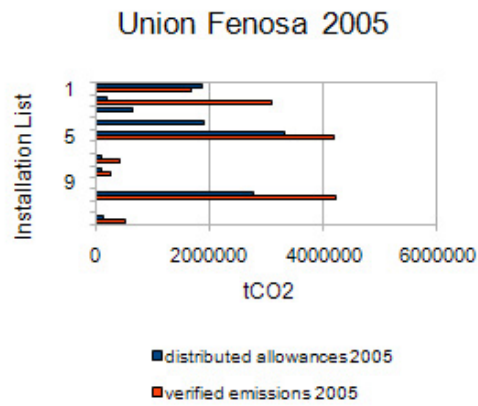


FIG. 3.30 – Quotas distribués et émissions vérifiées pour Union Fenosa en 2005 d'après Reuters Carbon Market Data

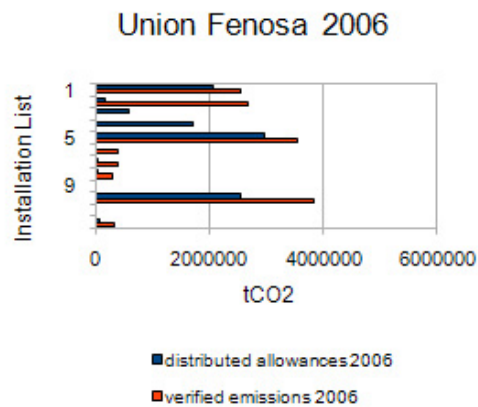


FIG. 3.31 – Quotas distribués et émissions vérifiées pour Union Fenosa en 2006 d'après Reuters Carbon Market Data

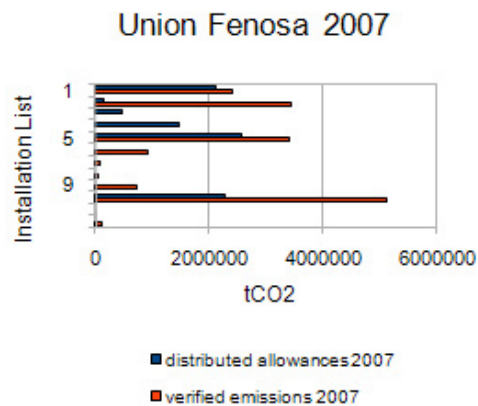


FIG. 3.32 – Quotas distribués et émissions vérifiées pour Union Fenosa en 2007 d'après Reuters Carbon Market Data

des quotas au niveau de la maison mère.

Conclusion

Le Chapitre 3 est consacré aux stratégies de gestion des risques adoptées par les firmes, en présence d'incertitudes politiques, économiques et financières sur un marché de permis d'émissions négociables tel que l'EU ETS.

La première section du Chapitre 3 constitue un exercice de caractérisation de l'aversion au risque des investisseurs sur le marché européen du carbone, en utilisant notamment une nouvelle base de données de prix d'options sur l'*European Climate Exchange*. Sur l'EU ETS, les investisseurs actualisent leurs anticipations concernant les rendements des quotas de CO₂ en fonction de contraintes institutionnelles. Plus précisément, nous avons testé la relation empirique entre la diffusion d'informations par la Commission Européenne et les changements dans l'aversion au risque des investisseurs autour de l'évènement de conformité 2006. La publication le 30 avril 2007 des émissions vérifiées de l'année de conformité 2006 par la Commission Européenne est centrale à l'analyse développée dans cette première section. Il s'agit en effet du seul évènement empiriquement observable depuis le lancement de produits dérivés, avec comme actif sous-jacent un quota de CO₂, pour lequel nous disposons de suffisamment de données *avant* et *après* pour capturer les changements potentiels dans l'aversion au risque. A partir du lien théorique qui existe entre les probabilités de distribution risque-neutre et historique d'une part, et l'aversion au risque d'autre part, nous avons construit notre stratégie d'estimation en adaptant à des prix d'options de durée plus longue les méthodes existantes développées par Jackwerth (2000), Aït-Sahalia et Lo (2000) et Rosenberg et Engle (2002). D'après Aït-Sahalia et Lo (2000), nous avons estimé la distribution risque-neutre de façon non-paramétrique à partir des prix d'options, tandis que la distribution historique a été estimée de façon semi-paramétrique à partir des séries de prix futures en utilisant un modèle GARCH asymétrique (Barone-Adesi et al. (2008), Rosenberg et Engle (2002)). Notre étude couvre la période allant du 1er octobre 2006 au 23 novembre 2007. Etant donné l'import-

tance de l'évènement annuel de conformité imposé par la Commission Européenne pour les stratégies de gestion des risques des acteurs de marché, nous avons choisi de découper notre base de données au 30 avril 2007.

Les principaux résultats de cette première section peuvent être résumés de la façon suivante. Premièrement, nous avons trouvé un niveau *plus faible* de volatilité implicite *après* l'annonce des résultats de conformité 2006 par la Commission Européenne pour les contrats de maturité décembre 2008 et décembre 2009. Ce résultat illustre le rôle critique de la diffusion d'information par le régulateur sur ce nouveau marché qui était attendu. Deuxièmement, nous avons mis en évidence un effet de levier inversé par rapport à celui qui est traditionnellement observé sur les marchés d'action, dans la mesure où des périodes de prix croissants coïncident avec des périodes de plus forte volatilité. Ce résultat révèle que le risque associé au fait de détenir un quota de CO₂ *après* l'évènement de conformité 2006 est lié à une structure de prix *croissants* dans un contexte de contrainte environnementale faible, mais qui est appelée à être plus restrictive en matière d'allocation future. Troisièmement, nous avons observé que le noyau de prix réagit de façon contra-cyclique. Quatrièmement, sur la base d'une comparaison possible entre les intervalles de maturité et de *moneyness*, nous avons montré que l'aversion au risque est *plus élevée* sur le marché européen du CO₂ que sur les marchés d'actions sur la période considérée. Il peut être utile de reconduire des études de cas au cours du développement de la Phase II de l'EU ETS, si la Commission Européenne décide de communiquer en fréquence trimestrielle par exemple. De même, il apparaît intéressant de conduire des recherches autour d'évènements particuliers, autres que les résultats annuels de conformité, qui sont également susceptibles d'affecter fortement les stratégies des investisseurs en matière de gestion des risques, par exemple en fonction de l'évolution des prix des énergies.

La deuxième section du Chapitre 3 montre que, suite à l'échange de quotas entre firmes, l'existence d'une incertitude sur la dotation de quotas incite les firmes à adopter un comportement de stockage afin de se prémunir contre le risque. La condition selon laquelle des firmes neutres au risque se prémunissent contre le risque en stockant des quotas porte sur la dérivée tierce de la fonction de production. De

plus, nous avons caractérisé la règle optimale de partage des risques en réponse à une incertitude qui porte, soit sur la répartition des permis entre les firmes, soit sur la dotation globale des permis. Ces règles dépendent des caractéristiques technologiques des firmes, et plus précisément de la concavité de la fonction de production vis-à-vis de la pollution.

Concernant l'évidence empirique, nous avons sélectionné trois types de firmes opérant sur l'EU ETS caractérisées par le surplus de quotas le plus élevé, le déficit de quotas le plus élevé et le plus fort émetteur de CO₂ sur le marché. Nous obtenons donc un échantillon de sept firmes parmi les 800 figurant dans la base de données *Reuters Carbon Market Data*. Ces études de cas nous apportent des intuitions qualitatives concernant les résultats théoriques. Premièrement, l'étude du comportement de stockage des firmes révèle des comportements de stockage (emprunt) asymétrique au niveau des installations en fonction de leur position longue (courte) sur la période 2005-2007. Ce résultat illustre ce qui était attendu de la Section 3.2.2, c'est à dire que la variation du nombre de quotas stockés par les firmes dépend de l'incertitude politique concernant les règles de transfert de quotas et les PNAQs de la Phase II. Deuxièmement, l'étude du comportement de mutualisation des quotas a confirmé le potentiel de transfert en interne entre les filiales par la maison mère. Ce résultat illustre la logique économique expliquée dans la Section 3.2.3, c'est à dire que la maison mère se comporte comme l'agence pour répartir optimalement le risque d'exposition à un déficit de quotas entre filiales.

D'un point de vue politique, il semble que l'acceptation d'une gestion de l'environnement par la mise en place de permis négociables implique que les firmes aient la possibilité d'effectuer du stockage, afin de pallier à l'incertitude liée aux décisions politiques. Le stockage des permis n'est pas ici justifié par de simples problèmes d'adaptation aux contraintes environnementales, mais apparaît comme un élément de réponse face aux risques de variation des décisions politiques engendrés par cet instrument. En lien avec le Chapitre 1, notre analyse a donc confirmé le rôle clef joué par les mécanismes de stockage en tant qu'outil de gestion des risques.

Annexes relatives au Chapitre 3

Annexe C

3.1 L'aversion au risque et la diffusion d'informations institutionnelles sur le marché européen du carbone : une étude des résultats de la période de conformité 2006

Méthode d'estimation

Distribution risque-neutre, distribution historique et noyau de prix

Soit S_t le prix d'un actif financier à la date t . Pour chaque date ultérieure à celle d'aujourd'hui, le prix de cet actif est incertain, et cette incertitude est quantifiée à travers des fonctions de distribution de probabilité. La distribution historique représente les anticipations d'un agent représentatif concernant le prix futur de cet actif. C'est la distribution qui donne une possibilité d'occurrence à chaque état possible futur d'un actif donné à une maturité donnée, en fonction de la perception du risque de l'agent représentatif. Cet agent est supposé agréger la vision globale de chacun des acteurs de marché.

Au contraire, la distribution risque-neutre est supposée être la distribution qui rend les agents neutres au risque et est utilisée pour donner un prix approprié aux actifs. Dans un cadre d'analyse à une période, cette distribution est telle que :

$$S_0 = e^{-r} \mathbb{E}^Q[S_1] \quad (3.40)$$

avec r le taux d'intérêt sans risque, et $\mathbb{E}^Q[\cdot]$ est l'espérance de S_1 sous la distribution risque-neutre Q . Cette distribution est supposée unique. Sous cette distribution, aucune possibilité d'arbitrage n'existe, et les prix de l'actif actualisés au taux d'intérêt sans risque doivent suivre une martingale. Pour trouver la relation représentée dans l'eq.(3.40), nous devons trouver la distribution de probabilité appropriée, qui ne peut être la distribution historique, et que l'on appelle risque-neutre. Dans ce qui suit, nous présentons le lien entre les distributions risque-neutre et historique.

Il existe plusieurs représentations du lien entre les distributions risque-neutre et historique. Soit $U(\cdot)$ la fonction d'utilité d'un agent représentatif de l'économie considérée. Dans un cadre d'analyse à une période, ce consommateur est supposé maximiser la fonction d'utilité agrégée $F(\cdot)$:

$$F(X) = U(C_0) + \beta \mathbb{E}^H[U(C_1(X))] \quad (3.41)$$

avec X le niveau d'épargne, et W la dotation initiale de l'agent. La consommation de l'agent à la date 0 est donnée par :

$$C_0 = W - X \quad (3.42)$$

A la date 0, l'agent est supposé investir X dans un actif financier dont le prix à la date 0 est S_0 et S_1 à la date 1, associé à un rendement risqué $R = \frac{S_1}{S_0} - 1$. Ensuite, à la date 1, la consommation de l'agent en incertitude est :

$$C_1 = X(1 + R) \quad (3.43)$$

avec R une variable aléatoire stationnaire. Avec ces notations, la fonction d'utilité agrégée peut être réécrite :

$$F(X) = U(W_0 - X) + \beta \mathbb{E}^H[U(X(1 + R))] \quad (3.44)$$

β représente le taux d'actualisation psychologique. $\mathbb{E}^H[\cdot]$ souligne le fait que l'espérance d'utilité est calculée par rapport à la distribution historique de R , c'est à dire à la distribution de probabilité historique que l'agent représentatif associe à R . Le programme d'optimisation s'écrit :

$$\max_X F(X) \quad (3.45)$$

Les conditions d'optimalité du premier ordre conduisent à l'expression suivante :

$$\beta \mathbb{E}^H \left[S_1 \frac{U'(C_1(S_1))}{U'(C_0)} \right] = S_0 \quad (3.46)$$

Cette relation est vraie pour tout type d'actif dans l'économie, et donc pour une obligation sans-risque rapportant \$1 quel que soit l'état de l'économie en seconde période. Le prix de l'actif à la date 1 est e^{-r} . Pour ce type d'actif, l'eq(3.46) devient :

$$\beta \mathbb{E}^H \left[\frac{U'(C_1(S_1))}{U'(C_0)} \right] = e^{-r} \quad (3.47)$$

En combinant les eq.(3.46) et (3.47), nous obtenons le lien entre les distributions risque-neutre et historique :

$$S_0 = e^{-r} \int S_1 \frac{\frac{U'(C_1(S_1))}{U'(C_0)}}{\mathbb{E}^H \left[\frac{U'(C_1(S_1))}{U'(C_0)} \right]} h(S_1) dS_1 = e^{-r} \int S_1 \xi(S_1) h(S_1) dX = e^{-r} \mathbb{E}^Q[S_1] \quad (3.48)$$

avec $h(\cdot)$ la fonction de densité de la distribution historique associée à la valeur future de l'actif S_1 sous incertitude.

Notons que :

- $h(S_1)\xi(S_1) \geq 0$
- $\int h(S_1)\xi(S_1)dS_1 = 1$

ce qui est cohérent avec l'idée selon laquelle $h(S_1)\xi(S_1)$ est une fonction de densité de la distribution historique.

Nous avons supposé jusqu'ici qu'il existe une unique distribution telle que :

$$S_0 = e^{-r}\mathbb{E}[S_1] \quad (3.49)$$

et qu'il s'agit de la distribution risque-neutre, avec une fonction de densité égale à $\xi(S_1)h(S_1)$. $\xi(\cdot)$ est appelé *Facteur d'Actualisation Stochastique* dans la littérature (Cochrane (2002), Gouriéroux et Montfort (2007)). La fonction de densité risque-neutre $q(\cdot)$ est donnée par :

$$q(S_1) = \xi(S_1)h(S_1) \quad (3.50)$$

En changeant légèrement les notations, nous obtenons le résultat suivant :

$$\xi(S_1) = \lambda U'(C_1(S_1)) \quad (3.51)$$

avec :

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{U'(C_0)}{\mathbb{E}^H \left[\frac{U'(C_1(S_1))}{U'(S_0)} \right]} \quad (3.52)$$

ce qui conduit à réécrire l'eq(3.50), après passage en log :

$$\log(q(S_1)) = \log \lambda + \log U'(C_1(X)) + \log h(X) \quad (3.53)$$

En différentiant cette dernière équation, nous obtenons la relation mise en évidence par Leland (1980) :

$$\frac{q'(S_1)}{q(S_1)} = \frac{U''(C_1(S_1))}{U'(C_1(S_1))} + \frac{h'(S_1)}{h(S_1)} \quad (3.54)$$

où $\frac{U''(C_1(S_1))}{U'(C_1(S_1))}$ est *par définition* l'aversion au risque de l'agent représentatif. L'aversion au risque du marché s'obtient comme suit :

$$RA(S_1) = -\frac{U''(S_1)}{U'(S_1)} = \frac{h'(S_1)}{h(S_1)} - \frac{q'(S_1)}{q(S_1)} \quad (3.55)$$

A partir des étapes précédentes, nous pouvons énoncer deux lemmes :

Lemma 1 *Soit S_t le prix d'un actif financier à la date t . Soit $h(\cdot)$ la fonction de densité associée à S sous la distribution historique. Nous avons :*

$$S_t = e^{-r(T-t)} \mathbb{E}^Q[S_T] \quad (3.56)$$

avec Q la mesure risque-neutre. La fonction de densité risque-neutre est définie par :

$$q(S_T) = h(S_T)\xi(S_T) \quad (3.57)$$

avec $\xi(\cdot)$ le facteur d'actualisation stochastique égal à :

$$\xi(S_T) = \frac{U'(C_T)}{U'(C_t)} \frac{1}{\mathbb{E}^H \left[\frac{U'(C_T)}{U'(C_t)} \right]} \quad (3.58)$$

avec $\mathbb{E}^H[\cdot]$ l'espérance sous la distribution historique.

Lemma 2 *D'après les notations du Lemme 1 concernant l'aversion au risque de l'agent représentatif, l'aversion au risque du marché est égale à :*

$$RA(S_T) = \frac{h'(S_T)}{h(S_T)} - \frac{q'(S_T)}{q(S_T)} \quad (3.59)$$

La projection du noyau de prix

La Section précédente reposait sur la consommation de l'agent représentatif, qui n'est pas toujours parfaitement observable. De façon à utiliser les rendements des actifs financiers qui sont la seule variable d'état mesurable, nous préférons utiliser le *noyau de prix projeté* tel que développé par Cochrane (2002) et Rosenberg et Engle (2002). Soit

$$\xi(C_T(S_T)) \quad (3.60)$$

le noyau de prix, en utilisant les précédentes notations. Le noyau de prix est seulement une fonction indirecte de S_T , à travers la consommation finale de l'agent représentatif, de telle façon que :

$$\xi(C_T(S_T)) = \frac{U'(C_T)}{U'(C_t)} \frac{1}{\mathbb{E}^H \left[\frac{U'(C_T)}{U'(C_t)} \right]}. \quad (3.61)$$

$$\xi(C_T(S_T)) = \frac{U'(C_T)}{U'(C_t)} \frac{1}{\mathbb{E}^H \left[\frac{U'(C_T)}{U'(C_t)} \right]}. \quad (3.62)$$

La relation basique de détermination du prix d'un actif donné S est :

$$S_t = \mathbb{E}[\xi(C_T)S_T] \quad (3.63)$$

$$= \int_{S_T} \int_{C_T} \xi(C_T)S_T h(S_T, C_T) dS_T dC_T \quad (3.64)$$

$$= \int_{S_T} \int_{C_T} \xi(C_T)S_T h(C_T|S_T) h(S_T) dS_T dC_T \quad (3.65)$$

$$= \int_{S_T} \mathbb{E}[\xi(C_T)|S_T] S_T h(S_T) dS_T \quad (3.66)$$

$$= \int_{S_T} \tilde{\xi}(S_T) S_T h(S_T) dS_T \quad (3.67)$$

$$= \mathbb{E}[\tilde{\xi}(S_T)S_T] \quad (3.68)$$

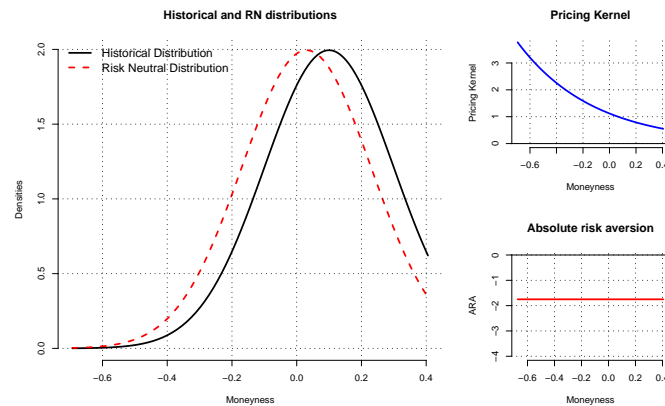


FIG. 3.33 – Le noyau de prix dans une économie à la Black Scholes

avec $\tilde{\xi}(S_T) = \mathbb{E}[\xi(C_T)|S_T]$ le noyau de prix projeté. Comme Cochrane (2002) l'a montré, le fait de travailler avec $\xi(\cdot)$ ou $\tilde{\xi}(\cdot)$ est équivalent, mais rend l'estimation considérablement plus tractable. Le facteur d'actualisation stochastique dépend seulement du prix de l'actif, et non de la consommation de l'agent représentatif. Rosenberg et Engle (2002) détaillent les articles existants dans la littérature qui utilisent cette approche comme un substitut à la consommation.

Le noyau de prix dans une économie à la Black-Scholes

Dans une économie à la Black-Scholes (1973), avec une fonction d'utilité CARA (*Constant Absolute Risk Aversion*), la dérivée du noyau de prix est :

$$\frac{d\mathbb{Q}}{d\mathbb{P}} = e^{A(t,T)+B(t,T) \log \frac{S_T}{S_t}}$$

avec \mathbb{Q} la mesure de la distribution risque-neutre, et \mathbb{P} la mesure de la distribution historique.

Le noyau de prix est une fonction exponentielle affine de la variable d'état, ici le logarithme du prix. Le noyau de prix contient donc une hypothèse implicite concernant la pente de l'aversion au risque, et nous donne une mesure de la distance entre les distributions risque-neutre et historique comme on le voit dans la Figure 3.33.

Pour une discussion concernant la projection du noyau de prix sur une seule variable d'état d'intérêt, on se reportera à la discussion de la section 3.1.3.

Test statistique du divorce entre les séries de prix spot et futures

Soit $F(t, T)$ le prix futures au temps t avec pour échéance un quota de CO₂ au temps T . Soit $S(t)$ le prix spot en t . En l'absence de coût de stockage de quotas de CO₂, il est équivalent de tester $S_t = F_T e^{-r(T-t)}$ ou $F_{T_1} e^{-r(T_1-t)} = F_{T_2} e^{-r(T_2-t)}$ étant donné que la valeur actualisée des contrats futures dans la dernière expression est égale à S_t .

Soit $x_t = F_{Dec.08} e^{-r(T_{Dec.08}-t)} - F_{Dec.09} e^{-r(T_{Dec.09}-t)}$ un processus stationnaire faiblement dépendant. Sachant que les futures sont simplement des valeurs actualisées du prix spot sous-jacent, on teste $\mathbb{E}[x_t] = 0$ statistiquement. L'hypothèse nulle de notre test est donc :

$$\begin{cases} H_0 : \mathbb{E}[x_t] = 0 \\ H_1 : \mathbb{E}[x_t] \neq 0 \end{cases} \quad (3.69)$$

Sous l'hypothèse de la variante Lindberg-Levy du Théorème Central Limite, il vient immédiatement que l'estimateur de cette espérance a pour distribution :

$$n \left(\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x_t - \mathbb{E}[x_t] \right) \xrightarrow{\mathcal{L}} N(0, \Sigma), \quad (3.70)$$

avec $\Sigma = n^2 \times \mathbb{V} \left[\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x_t \right]$. Cette dernière variable est estimée en utilisant la procédure de Newey West de variance asymptotique (Hall (2005)). Sous l'hypothèse nulle, la statistique de test est :

$$t_n = \frac{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x_t}{\Sigma/n} \quad (3.71)$$

et doit se trouver dans l'intervalle de confiance usuel à 95%. Pour plus détails, voir Greene (2000)⁴⁹.

⁴⁹Théorème Central Limite Univarié, p.116.

Sample mean	0.29
Sample Std. Dev.	0.02
Test Statistics	13.19
P-value	0.00

TAB. 3.1 – Statistiques du test de l'écart entre les séries de prix futures de maturité Décembre 2008 et Décembre 2009

	Prix d'exercice en €																																							
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33		
Décembre 2008																																								
Options d'achat	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285
Options de vente	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	285	
Total	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	570	
Prix d'exercice en €	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33				
Décembre 2009																																								
Options d'achat	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	
Options de vente	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	247	
Total	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	494	

TAB. 3.2 – Nombre de prix d'options disponibles sur ECX

	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Prix d'exercice en €																		
Décembre 2008																		
Options d'achat	N.A.	N.A.	50	50	142	143	73	159	213	58	185	317	96	500	222	158	N.A.	100
Options de vente	185	80	118	172	103	58	58	200	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Total	185	80	168	222	246	200	132	359	213	58	185	317	96	500	222	158	N.A.	100
Prix d'exercice en €																		
Décembre 2009																		
Options d'achat	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	135	N.A.	50	N.A.	N.A.	366	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	217	N.A.	N.A.	N.A.
Options de vente	N.A.	N.A.	N.A.	15	200	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Total	N.A.	N.A.	N.A.	15	335	N.A.	50	N.A.	N.A.	366	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	217	N.A.	N.A.	N.A.

TAB. 3.3 – Volume moyen par contrat pour chaque prix d'exercice sur ECX

	Min	Max	Average	Std. Dev.	Skewness	Excess Kurtosis	Jarque Berra test	Box pierce test
<i>Contrat de maturité Décembre 2008</i>								
Rendements	-0,092	0,094	0,001	0,026	-0,404	1,667	0	0,202
Résidus	-2,644	2,027	-0,002	0,91	-0,345	-0,104	0,056	0,265
Résidus échantillon #1	-2,618	1,963	-0,026	0,872	-0,452	0,355	0,091	0,236
Résidus échantillon #2	-2,644	2,027	0,017	0,939	-0,262	-0,347	0,306	0,865
<i>Contrat de maturité Décembre 2009</i>								
Rendements	-0,088	0,101	0,001	0,025	-0,259	1,685	0	0,332
Résidus	-2,619	2,076	-0,005	0,908	-0,306	-0,149	0,097	0,377
Résidus échantillon #1	-2,373	2,086	-0,034	0,871	-0,337	0,172	0,292	0,467
Résidus échantillon #2	-2,619	1,985	0,018	0,936	-0,272	-0,31	0,307	0,837

TAB. 3.4 – Statistiques descriptives pour les contrats de maturité Décembre 2008 et Décembre 2009 avec *StdDev*, l'écart type, *Skewness* le coefficient de dissymétrie, et *ExcessKurtosis* l'excès de coefficient d'aplatissement.

	ω_0	ω_1	α	β	δ	μ	Log-likelihood
<i>Contrat de maturité Décembre 2008</i>							
ARCH(1)	Estimate	0,079	-0,033	0,088	-	0,129	-666,097
	t-Stat.	6,074	-2,261	12,054	-	6,036	0,000
GARCH(1,1)	Estimate	0,010	-0,006	0,102	0,812	0,150	-659,105
	t-Stat.	3,552	-5,336	54,798	152,358	8,159	0,000
GJR-GARCH(1,1)	Estimate	0,009	-0,006	0,128	0,823	-0,061	-658,519
	t-Stat.	3,799	-5,859	39,471	164,938	-18,046	0,000
<i>Contrat de maturité Décembre 2009</i>							
ARCH(1)	Estimate	0,081	-0,037	0,078	-	0,136	-659,259
	t-Stat.	5,800	-2,378	12,292	-	6,625	0,000
GARCH(1,1)	Estimate	0,009	-0,006	0,105	0,808	0,150	-652,274
	t-Stat.	3,832	-5,544	54,869	155,761	8,709	0,000
GJR-GARCH(1,1)	Estimate	0,009	-0,006	0,132	0,820	-0,064	-651,645
	t-Stat.	4,238	-6,250	38,876	170,801	-18,370	0,000

TAB. 3.5 – Résultats d'estimation pour les contrats de maturité Décembre 2008 et Décembre 2009

Le modèle estimé s'écrit :

$$\begin{aligned}
 r_t &= \mu + \sigma_t \epsilon_t \\
 \sigma_t^2 &= \omega_0 + \omega_1 I_t + \alpha(r_{t-1} - \mu)^2 + \beta \sigma_{t-1}^2 + \delta \max(0, -(r_{t-1} - \mu))^2 \\
 \epsilon_t &\sim N(0, 1)
 \end{aligned}$$

3.2 Stockage de quotas en incertitude et règle optimale de partage des risques : théorie et évidence empirique

3.2.4 Evidence empirique

Liste Instal- lation	Pays	Activité	Identifiant Permis	Quotas Dis- tribus 2005	Emissions Vérifiées 2005	Position Nette Courte/Longue 2005	Quotas Dis- tribus 2006	Emissions Vérifiées 2006	Position Nette Courte/Longue 2006	Quotas Dis- tribus 2007	Emissions Vérifiées 2007	Position Nette Courte/Longue 2007
1	France	Combustion	6301117	32067	21607	10460	32067	16732	15335	32067	18734	13333
2	Roumanie	Fourneaux	02-14-2007	0	0	0	0	0	0	10740796	10740796	10740796
3	France	Fer	6201286	264048	208249	55799	264048	236087	27961	264048	2378	261670
4	Belgique	Fer	VL201	9358697	4896453	4462244	9358697	5238916	4119781	9358697	4086947	4671750
5	Roumanie	Ciment	05-24-2007	0	0	0	0	0	0	57844	3059	54785
6	Roumanie	Fourneaux	05-25-2007	0	0	0	0	0	0	210315	96994	113321
7	Espagne	Fer	ES152805000837	60495	62372	-1877	60495	72612	-12117	60495	72619	113321
8	France	Fer	6401052	9140902	8494864	646038	9140902	8725948	414954	9140901	7950830	1190071
9	Espagne	Combustion	ES104601001147	0	0	0	24239	15882	8357	24239	16334	7905
10	Rap	Fer	CZ-0435-07	0	0	0	0	0	0	0	7048	-7048
	Tchéquie											
11	Belgique	Fer	VL202	229692	185972	43720	229692	207584	22108	229692	17634	212058
12	Allemagne	Combustion	14310-0819	31449	87444	-55995	31449	72779	-41330	249966	82266	167700
13	Allemagne	Fer	14220-0024	3416399	2582432	833967	3416399	2854331	562068	3416399	2984047	432352
14	Allemagne	Fer	14220-0033	96771	79619	17152	96771	100849	-4078	96771	97972	-1201
15	Allemagne	Ciment	14240-0073	163007	136510	26497	163007	167828	-4821	163007	155281	7726
16	Allemagne	Fer	14225-0001	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	Allemagne	Fer	14220-0038	2101714	1501581	600133	2101714	1951193	150521	2101714	1852048	249666
18	France	Fer	7000956	12244979	11534467	710512	12244979	11578949	666030	12244978	12059456	185522
19	France	Combustion	7000955	48558	29108	19450	48558	27512	21046	48559	25334	23225
20	France	Combustion	5101363	112163	70993	41170	112163	71407	40756	112162	6783	105379
21	France	Fer	6201364	4615803	4353850	261953	4615803	4737538	-121735	4615802	4321829	293973
22	Allemagne	Fer	14220-0007	284157	264572	19585	289805	267866	22219	286981	272139	14842
23	Belgique	Fer	WAH133P047	61946	3376	58570	61947	22311	39636	61947	25233	36714
24	Belgique	Fer	WAH141P047	317512	186099	131413	317513	212166	105347	317513	177203	140310
25	Allemagne	Fer	14225-0004	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total				42580359	34699568	7880791	42610248	36578210	6032038	53834893	34932168	18902725

TAB. 3.6 – Quotas distribués, émissions vérifiées et position nette courte/longue pour ArcelorMittal (2005-2007)
d'après Reuters Carbon Market Data

Liste Installation	Pays	Activité	Identifiant Permis	Quotas Dis-tribués 2005		Emissions Vérifiées 2005		Position Nette Courte/Longue 2005		Quotas Dis-tribués 2006		Emissions Vérifiées 2006		Position Nette Courte/Longue 2006		Quotas Dis-tribués 2007		Emissions Vérifiées 2007		Position Nette Courte/Longue 2007	
				tribués 2005	tribués 2005	Vérifiées 2005	Vérifiées 2005	Position Nette Courte/Longue 2005	Position Nette Courte/Longue 2005	tribués 2006	tribués 2006	Vérifiées 2006	Vérifiées 2006	Position Nette Courte/Longue 2006	Position Nette Courte/Longue 2006	tribués 2007	tribués 2007	Vérifiées 2007	Vérifiées 2007	Position Nette Courte/Longue 2007	Position Nette Courte/Longue 2007
1	Allemagne	Combustion	14310-0936	1408	1408	0	1408	1408	1408	1408	1408	0	1408	1408	1408	1408	1408	1408	1408	1408	1408
2	France	Combustion	5401474	16643	16643	12462	12462	4181	15374	16643	16643	1269	1269	15374	16642	16642	13037	13037	3605	3605	
3	France	Combustion	5401291	8899	8899	6932	6932	1967	8899	8899	8899	6822	6822	2077	8898	8898	6236	6236	2662	2662	
4	Pologne	Combustion	PL-0119-05	92	92	8699	8699	-8607	-8580	92	92	8672	8672	-8580	92	92	6454	6454	-6362	-6362	
5	Pologne	Combustion	PL-0118-05	52	52	5305	5305	-5253	-5511	52	52	5563	5563	-5511	52	52	5139	5139	-5087	-5087	
6	France	Combustion	6506250	12359	12359	0	0	12359	12359	12359	12359	0	0	12359	0	0	0	0	0	0	
7	France	Combustion	10100059	39363	39363	18349	18349	21014	21014	39363	39363	29305	29305	10058	39364	39364	30138	30138	9226	9226	
8	France	Combustion	6804213	29774	29774	25736	25736	4038	29774	29774	29774	25544	25544	4230	29775	29775	26541	26541	3234	3234	
9	France	Combustion	6506348	29086	29086	24995	24995	4091	29086	29086	29086	24727	24727	4359	29086	29086	2144	2144	26942	26942	
10	France	Combustion	6507039	132299	132299	100653	100653	31646	132299	132299	132299	10219	10219	122080	1323	1323	104265	104265	-102942	-102942	
11	France	Combustion	6301088	13936	13936	2917	2917	11019	11019	13936	13936	2321	2321	11615	13935	13935	2205	2205	11730	11730	
12	France	Combustion	10000670	37602	37602	28772	28772	8830	37602	37602	37602	28287	28287	37601	37601	37601	26837	26837	10764	10764	
13	France	Combustion	7001019	15176	15176	11016	11016	4160	15176	15176	15176	8393	8393	6783	15176	15176	824	824	14352	14352	
14	France	Combustion	5701271	24004	24004	18023	18023	5981	24004	24004	24004	17909	17909	6095	24003	24003	16718	16718	7285	7285	
15	France	Combustion	7001008	16529	16529	10524	10524	6005	16529	16529	16529	99	99	16430	16529	16529	944	944	15585	15585	
16	France	Combustion	5600126	54	54	182	182	-128	54	54	54	473	473	55	55	55	167	167	-112	-112	
17	France	Combustion	5600072	18173	18173	12367	12367	5806	18173	18173	18173	9996	9996	8177	18173	18173	8647	8647	9526	9526	
18	France	Combustion	7000994	4655	4655	2285	2285	2370	4655	4655	4655	2258	2258	2397	4654	4654	2171	2171	2483	2483	
19	France	Combustion	7001007	13821	13821	9724	9724	4097	13821	13821	13821	9209	9209	4612	1382	1382	7785	7785	-6403	-6403	
20	France	Combustion	7001005	25248	25248	19230	19230	6018	25248	25248	25248	20033	20033	5215	25247	25247	18517	18517	6730	6730	
21	France	Combustion	10001610	20674	20674	8928	8928	11746	20674	20674	20674	8598	8598	12076	20674	20674	8383	8383	12291	12291	
22	France	Combustion	6103619	3614	3614	2144	2144	1470	3614	3614	3614	2248	2248	1366	3615	3615	2578	2578	1037	1037	
23	France	Combustion	7001215	9212	9212	5488	5488	3724	9212	9212	9212	5702	5702	3510	9212	9212	6036	6036	3176	3176	
24	France	Combustion	7204930	25699	25699	15622	15622	10077	25699	25699	25699	19392	19392	6307	25700	25700	13831	13831	11869	11869	
25	France	Combustion	5101900	23455	23455	17960	17960	5495	23455	23455	23455	17693	17693	5762	23454	23454	16841	16841	6613	6613	
26	France	Combustion	6506346	9732	9732	6451	6451	3281	9732	9732	9732	6644	6644	3088	9733	9733	592	592	9141	9141	
27	France	Combustion	5104966	14428	14428	9358	9358	5070	14428	14428	14428	8409	8409	6019	14427	14427	825	825	13602	13602	
28	France	Combustion	6506331	8538	8538	6699	6699	1839	8538	8538	8538	6577	6577	1961	8537	8537	5426	5426	3111	3111	
29	France	Combustion	6104721	6556	6556	4630	4630	1926	6556	6556	6556	6031	6031	525	6555	6555	1468	1468	5087	5087	
30	France	Combustion	10000710	15690	15690	12298	12298	3392	15690	15690	15690	12164	12164	3526	15690	15690	12378	12378	3312	3312	
31	France	Combustion	10004212	44547	44547	29785	29785	14762	44547	44547	44547	32304	32304	12243	44546	44546	28353	28353	16193	16193	
32	Rep Tchèque	Combustion	CZ-0317-05	1536408	1536408	1272513	1272513	263895	1536408	1536408	1536408	1395596	1395596	140812	1536408	1536408	1366581	1366581	169827	169827	
33	France	Combustion	5902116	105280	105280	77601	77601	27679	105280	105280	105280	89461	89461	15819	105280	105280	86921	86921	18359	18359	
34	Rep Tchèque	Combustion	CZ-0320-05	277	277	168	168	109	277	277	277	0	0	277	277	277	19	19	258	258	
35	Rep Tchèque	Combustion	CZ-0236-05	121980	121980	2453	2453	119527	121980	121980	121980	1472	1472	120508	121980	121980	1854	1854	120126	120126	
36	Rep Tchèque	Combustion	CZ-0326-05	12412	12412	10650	10650	1762	12412	12412	12412	10133	10133	2279	12412	12412	9864	9864	2548	2548	
37	Rep Tchèque	Combustion	CZ-0323-05	1187	1187	652	652	535	1187	1187	1187	612	612	575	1187	1187	538	538	649	649	
38	Rep Tchèque	Combustion	CZ-0324-05	9694	9694	6	6	9688	9694	9694	9694	0	0	9694	9694	9694	9694	9694	9694	9694	9694
39	France	Combustion	6506493	14174	14174	11624	11624	2550	14174	14174	14174	13052	13052	1122	14174	14174	8562	8562	5612	5612	
40	France	Combustion	6506496	22855	22855	14020	14020	8835	22855	22855	22855	19605	19605	3250	22856	22856	17724	17724	5132	5132	
41	France	Combustion	6506494	13637	13637	11096	11096	2541	13637	13637	13637	10781	10781	2856	13636	13636	9535	9535	4101	4101	
42	France	Combustion	6506495	17019	17019	13293	13293	3726	17019	17019	17019	12866	12866	4153	17020	17020	11455	11455	5565	5565	

TAB. 3.7 – Quotas distribués, émissions vérifiées et position nette courte/longue pour Dalkia, Installations #1-42 (2005-2007) d'après Reuters Carbon Market Data

Liste Installation	Pays	Activité	Identifiant Permis	Quotas tribués 2005	Emissions Vérifiées 2005	Position Nette Courte/Longue 2005	Quotas tribués 2006	Emissions Vérifiées 2006	Position Nette Courte/Longue 2006	Quotas tribués 2007	Emissions Vérifiées 2007	Position Nette Courte/Longue 2007
43	France	Combustion	12100006	258367	161935	96432	258367	160822	97545	258366	161574	96792
44	France	Combustion	6205585	30298	19733	10565	30298	18655	11643	30297	16661	13636
45	Rep	Combustion	CZ-0322-05	25331	10436	14895	25331	12526	12805	25331	3148	22183
46	Tchèque	Combustion	6702704	45079	36378	8701	45079	3518	41561	45079	33679	11400
47	Rep	Combustion	CZ-0329-05	259849	231008	28841	259849	212172	47677	259849	212777	47072
48	Tchèque	Combustion	CZ-0330-05	145109	134628	10481	145109	128543	16566	145109	120889	24220
49	Tchèque	Combustion	CZ-0328-05	500434	459501	40933	500434	463885	36549	500434	422977	77457
50	Rep	Combustion	CZ-0327-05	83906	74250	9656	83906	78063	5843	83906	79149	4757
51	Tchèque	Combustion	CZ-0321-05	485373	438908	46465	485373	398661	86712	485373	425107	60266
52	Rep	Combustion	CZ-0325-05	530000	547298	-17298	530000	544509	-14509	530000	436681	93319
53	Tchèque	Combustion	CZ-0318-05	198090	172429	25661	198090	160004	38086	198090	155261	42829
54	Rep	Combustion	CZ-0237-05	1071343	1112121	-40778	1071343	1080780	-9437	1071343	946572	124771
55	Tchèque	Rep	CZ-0362-05	6872	5169	1703	6872	486	6386	0	4312	-4312
56	Rep	Combustion	CZ-0319-05	47017	33895	13122	47017	34253	12764	47017	35112	11905
57	Tchèque	Combustion	5100692	18226	14319	3907	18226	13604	4622	18226	11914	6312
58	France	Combustion	5302859	16138	12453	3685	16138	12528	3610	16138	11062	5076
59	France	Combustion	6301089	27413	2851	24562	27413	933	26480	27414	764	26650
60	France	Combustion	6400007	26594	22012	4582	26594	19942	6652	26594	9308	17286
61	France	Combustion	5101812	23347	18309	5038	23347	17749	5598	23348	1708	21640
62	France	Combustion	5900460	8597	5653	2944	8597	749	7848	8597	6466	2131
63	France	Combustion	6506455	28045	21164	6881	28045	20907	7138	28046	19979	8067
64	France	Combustion	10000729	49206	21583	27623	49206	21487	27719	49206	22161	27045
65	France	Combustion	6000326	1608	1947	-339	1608	3886	-2278	1608	322	1286
66	France	Combustion	6103448	9752	8252	1500	9752	7132	2620	9752	739	9013
67	France	Combustion	5800444	58868	45017	13851	58868	45461	13407	58869	41996	18873
68	France	Combustion	5800446	16564	12478	4086	16564	12446	4118	16563	11243	5320
69	France	Combustion	5101102	28111	19981	8130	28111	17844	10267	28112	16994	11118
70	France	Combustion	5702209	20950	17017	3933	20950	15687	5263	20949	15035	5914
71	France	Combustion	6202458	10201	7994	2207	10201	7667	2534	10201	7051	3150
72	France	Combustion	7001170	41867	33151	8716	41867	32761	9106	41866	32409	9457
73	France	Combustion	58002051	11296	10635	661	11296	8914	2382	11297	4234	7063
74	France	Combustion	5800448	59079	43790	15289	59079	47574	11505	59080	41412	17668
75	France	Combustion	6505672	10670	7607	3063	10670	7533	3137	10669	6999	3670
76	France	Combustion	6505673	12676	9341	3335	12676	977	11699	12677	9116	3561
77	France	Combustion	6507535	16055	11627	4428	16055	11721	4334	16055	10796	5259
78	France	Combustion	6505669	6491	4951	1540	6491	5103	1388	6491	4455	2036
79	France	Combustion	6400260	9141	7845	1296	9141	6535	2606	914	581	333
80	France	Combustion	6501948	23865	16709	7156	23865	16052	7813	23865	12233	11632
81	France	Combustion	5701841	11568	8830	2738	11568	8409	3159	11568	8182	3386
82	France	Combustion	1000438	38511	29523	8988	38511	14414	24097	38512	3456	35056
83	France	Combustion	10004382	21041	16679	4362	21041	16443	4598	21040	16543	4497
84	France	Combustion	7001213	4091	6657	-2566	4091	16214	-12123	4090	15879	-11789

TAB. 3.8 – Quotas distribués, émissions vérifiées et position nette courte/longue pour Dalkia, Installations #43-84

Liste Installation	Pays	Activité	Identifiant Permis	Quotas Distribués 2005	Emissions Vérifiées 2005	Position Nette Courte/Longue 2005	Quotas Distribués 2006	Emissions Vérifiées 2006	Position Nette Courte/Longue 2006	Quotas Distribués 2007	Emissions Vérifiées 2007	Position Nette Courte/Longue 2007
85	France	Combustion	7001214	169972	107279	62693	169972	106738	63234	169972	10343	159629
86	France	Combustion	5801277	36927	29429	7498	36927	30474	6453	36927	28154	8773
87	France	Combustion	7001023	23864	6312	17552	23864	8938	14926	23863	5267	18596
88	France	Combustion	7001022	11120	8897	2223	11120	9131	1989	11121	899	10222
89	France	Combustion	7001564	12166	7187	4979	12166	8624	3542	12167	8532	3635
90	France	Combustion	7000998	8976	5693	3283	8976	5988	2988	8977	5953	3024
91	France	Combustion	5800447	17184	8190	8994	17184	8292	8892	17185	7436	9749
92	France	Combustion	6702335	22246	17541	4705	22246	16967	5279	22247	17494	4753
93	France	Combustion	10800048	40238	32892	7346	40238	28803	11435	40238	28444	11794
94	France	Combustion	6600637	69569	48950	20619	69569	38505	31064	69570	36534	33036
95	France	Combustion	10000045	59542	44876	14666	59542	41564	17978	59541	38008	21533
96	Pologne	Combustion	PL-0097-05	47400	16252	31148	47400	10957	36443	47400	7430	39970
97	Pologne	Combustion	PL-0098-05	1752300	1697392	54908	1752300	1622121	130179	1752300	1505584	246716
98	Pologne	Combustion	PL-0104-05	649700	540263	109437	649700	538958	110742	649700	545138	104562
99	Pologne	Combustion	PL-0103-05	1151200	1039988	111212	1151200	949324	201876	1151200	1105197	46003
100	Pologne	Combustion	PL-0102-05	1057400	956264	101136	1057400	932665	124735	1057400	947299	110101
101	France	Combustion	6504212	100808	59494	41314	100808	5781	95027	100808	54519	46289
102	France	Combustion	6803995	59296	41493	17803	59296	40881	18415	59296	38993	20303
103	Slovaquie	Combustion	105-027-2005	7865	7049	816	7865	6787	1078	7864	5735	2129
104	Slovaquie	Combustion	105-024-2005	7881	7317	564	7880	6376	1504	7880	5726	2154
105	Slovaquie	Combustion	105-019-2005	6743	4585	2158	6743	436	6307	6742	3283	3459
106	Slovaquie	Combustion	105-020-2005	7251	6358	893	7251	5854	1397	7251	5094	2157
107	Slovaquie	Combustion	105-033-2005	13556	12696	860	13556	12053	1503	13556	10797	2759
108	Slovaquie	Combustion	105-034-2005	5124	890	4234	5124	380	4744	5124	193	4931
109	Slovaquie	Combustion	105-029-2005	7165	6288	877	7165	5669	1496	7165	4927	2238
110	Slovaquie	Combustion	105-017-2005	5744	5293	451	5744	4851	893	5744	4266	1478
111	Slovaquie	Combustion	105-008-2005	6397	5974	423	6397	5386	1011	6396	4759	1637
112	Slovaquie	Combustion	105-032-2005	7912	7452	460	7912	6862	1050	7911	6015	1896
113	Slovaquie	Combustion	105-026-2005	6479	6415	64	6478	581	5897	6478	5037	1441
114	Slovaquie	Combustion	105-025-2005	4964	4551	413	4964	426	4538	4963	3857	1106
115	Slovaquie	Combustion	105-021-2005	4715	5219	-504	4715	4293	422	4715	3631	1084
116	Slovaquie	Combustion	105-028-2005	7396	5968	1428	7395	5810	1585	7395	5080	2315
117	Slovaquie	Combustion	105-016-2005	6425	5889	536	6425	5438	987	6424	4694	1730
118	Slovaquie	Combustion	105-023-2005	5520	5372	148	5520	5001	519	5520	4457	1063
119	Slovaquie	Combustion	105-031-2005	6781	6477	304	6780	5853	927	6780	5218	1562
120	Slovaquie	Combustion	105-030-2005	5044	4451	593	5044	4152	892	5044	3748	1296
121	Slovaquie	Combustion	105-022-2005	6788	6646	142	6788	6159	629	6788	5436	1352
122	Slovaquie	Combustion	105-018-2005	4117	3499	618	4116	3132	984	4116	2854	1262
123	Roumanie	Combustion	03-30-2007	0	0	0	0	0	0	514797	340204	174593
124	France	Combustion	5401262	4768	3958	810	4768	3946	822	4768	3354	1414
125	Belgique	Combustion	WAI124P065	6172	6618	-446	6173	4477	1696	6173	3242	2931
Total				12207995	10525031	1682964	12207991	10106621	2101370	12551909	10118300	2433609

TAB. 3.9 – Quotas distribués, émissions vérifiées et position nette courte/longue pour Dalkia, Installations #85-125 (2005-2007) d'après Reuters Carbon Market Data

Liste tallation	Ins-	Pays	Activité	Identifiant Per- mis	Quotas Dis- tribués 2005	Emissions Vérifiées 2005	Position Nette Courte/Longue 2005	Quotas Dis- tribués 2006	Emissions Vérifiées 2006	Position Nette Courte/Longue 2006	Quotas Dis- tribués 2007	Emissions Vérifiées 2007	Position Nette Courte/Longue 2007
<i>Esti Energia</i>													
1		Estonie	Combustion	KL-0022	505968	373270	132698	537952	371992	165960	572064	302229	269835
<i>Enel</i>													
3		Espagne	Combustion	ES025001000989	226476	784539	-558063	88931	211016	-122085	0	6225	-6225
4		Espagne	Combustion	ES011101000060	1543744	2126527	-582783	1386012	1407854	-21842	1208371	1919952	-711581
5		Espagne	Combustion	ES011401000047	583889	982336	-398447	524230	947485	-423255	457041	404548	52493
6		Espagne	Combustion	ES024401000188	289262	67133	222129	270088	5556	264532	0	0	0
7		Espagne	Combustion	ES025001000187	820404	1193541	-373137	736580	562635	173945	642175	1039547	-397372
8		Espagne	Combustion	ES071301000402	434947	891905	-456958	390506	1022993	-632487	340456	732426	-391970
9		Espagne	Combustion	ES080801000514	3898722	6045981	-2147259	3396347	4157539	-761192	2648043	4102698	-1454655
Total													

TAB. 3.10 – Quotas distribués, émissions vérifiées et position nette courte/longue pour Esti Energia et Enel (2005-2007) d'après Reuters Carbon Market Data

Liste Installation	Pays	Activité	Identifiant Permis	Quotas Distribués 2005		Emissions Vérifiées 2005		Position Nette Courte/Longue 2005		Quotas Distribués 2006		Emissions Vérifiées 2006		Position Nette Courte/Longue 2006		Quotas Distribués 2007		Emissions Vérifiées 2007		Position Nette Courte/Longue 2007	
				tribusés 2005	tribusés 2005	Vérifiées 2005	Vérifiées 2005	Nette Courte/Longue	Nette Courte/Longue	tribusés 2006	tribusés 2006	Vérifiées 2006	Vérifiées 2006	Nette Courte/Longue	Nette Courte/Longue	tribusés 2007	tribusés 2007	Vérifiées 2007	Vérifiées 2007	Nette Courte/Longue	Nette Courte/Longue
1	Allemagne	Combustion	14310-0066	5624	3341	3341	2283	5624	0	5624	5624	0	5624	5624	5624	5624	5624	5624	5624	5624	
2	Allemagne	Combustion	14310-0110	3470	3323	3323	147	3470	4948	3470	3470	4948	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	3470	
3	Allemagne	Combustion	14310-0247	16898	17098	17098	-200	16898	15887	16898	16898	15887	16898	16898	16898	16898	16898	16898	16898	16898	
4	Allemagne	Combustion	14310-0346	12204	11243	11243	961	12204	9607	12204	12204	9607	12204	12204	12204	12204	12204	12204	12204	12204	
5	Allemagne	Combustion	14310-0350	17154	16515	16515	639	17154	15976	17154	17154	15976	17154	17154	17154	17154	17154	17154	17154	17154	
6	Allemagne	Combustion	14310-0384	4503	301	301	4202	4503	380311	4503	4503	380311	4503	4503	4503	4503	4503	4503	4503	4503	
7	Allemagne	Combustion	14310-0394	400918	393426	393426	7492	400918	380311	400918	400918	380311	400918	400918	400918	400918	400918	400918	400918	400918	
8	Allemagne	Combustion	14310-0399	22125	21219	21219	906	22125	19696	22125	22125	19696	22125	22125	22125	22125	22125	22125	22125	22125	
9	Allemagne	Combustion	14310-0693	17128	11438	11438	5690	17128	11484	17128	17128	11484	17128	17128	17128	17128	17128	17128	17128	17128	
10	Allemagne	Combustion	14310-0788	93351	76198	76198	17153	93351	68302	93351	93351	68302	93351	93351	93351	93351	93351	93351	93351	93351	
11	Allemagne	Combustion	14310-0855	31934	23879	23879	8055	31934	24512	31934	31934	24512	31934	31934	31934	31934	31934	31934	31934	31934	
12	Allemagne	Combustion	14310-0862	45304	30749	30749	14555	45304	27867	45304	45304	27867	45304	45304	45304	45304	45304	45304	45304	45304	
13	Allemagne	Combustion	14310-0903	42359	30234	30234	12125	42359	29596	42359	42359	29596	42359	42359	42359	42359	42359	42359	42359	42359	
14	Allemagne	Combustion	14310-0955	9036	7446	7446	1590	9036	6587	9036	9036	6587	9036	9036	9036	9036	9036	9036	9036	9036	
15	Allemagne	Combustion	14310-0957	17704	16652	16652	1052	17704	15669	17704	17704	15669	17704	17704	17704	17704	17704	17704	17704	17704	
16	Allemagne	Combustion	14310-1036	9892	8919	8919	973	9892	10447	9892	9892	10447	9892	9892	9892	9892	9892	9892	9892	9892	
17	Allemagne	Combustion	14310-1048	4662	5224	5224	-562	4662	0	4662	4662	0	4662	4662	4662	4662	4662	4662	4662	4662	
18	Allemagne	Combustion	14310-1052	6709	790	790	5919	6709	6709	6709	6709	6709	6709	6709	6709	6709	6709	6709	6709	6709	
19	Allemagne	Combustion	14310-1054	642	494	494	148	642	438	642	642	438	642	642	642	642	642	642	642	642	
20	Allemagne	Combustion	14310-1055	13929	15082	15082	-1153	13929	14498	13929	13929	14498	13929	13929	13929	13929	13929	13929	13929	13929	
21	Allemagne	Combustion	14310-1057	17751	15129	15129	2622	17751	15071	17751	17751	15071	17751	17751	17751	17751	17751	17751	17751	17751	
22	Allemagne	Combustion	14310-1059	6395	10233	10233	-3838	6395	7861	6395	6395	7861	6395	6395	6395	6395	6395	6395	6395	6395	
23	Allemagne	Combustion	14310-1150	10061	12342	12342	-2281	10061	11127	10061	10061	11127	10061	10061	10061	10061	10061	10061	10061	10061	
24	Allemagne	Combustion	14310-1300	7355	6799	6799	556	7355	725	7355	7355	725	7355	7355	7355	7355	7355	7355	7355	7355	
25	Allemagne	Combustion	14320-0006	114150	69031	69031	45119	114150	7815	114150	114150	7815	114150	114150	114150	114150	114150	114150	114150	114150	
26	Allemagne	Combustion	14330-0024	33708	2158	2158	31550	33708	22831	33708	33708	22831	33708	33708	33708	33708	33708	33708	33708	33708	
27	Allemagne	Combustion	14330-0025	1645	1486	1486	159	1645	171	1645	1645	171	1645	1645	1645	1645	1645	1645	1645	1645	
28	Allemagne	Combustion	14330-0026	5277	1662	1662	3615	5277	6681	5277	5277	6681	5277	5277	5277	5277	5277	5277	5277	5277	
29	Allemagne	Combustion	14330-0027	20711	38215	38215	-17504	20711	32002	20711	20711	32002	20711	20711	20711	20711	20711	20711	20711	20711	
30	Allemagne	Combustion	14330-0028	31010	26805	26805	4205	31010	50338	31010	31010	50338	31010	31010	31010	31010	31010	31010	31010	31010	
31	Allemagne	Combustion	14330-0029	11612	14057	14057	-2445	11612	13889	11612	11612	13889	11612	11612	11612	11612	11612	11612	11612	11612	
32	Allemagne	Combustion	14330-0031	3275	981	981	2294	3275	2371	3275	3275	2371	3275	3275	3275	3275	3275	3275	3275	3275	
33	Allemagne	Combustion	14330-0032	169298	14698	14698	154600	169298	178301	169298	169298	178301	169298	169298	169298	169298	169298	169298	169298	169298	
34	Allemagne	Combustion	14310-0435	98988	101312	101312	-2324	98988	161801	98988	98988	161801	98988	98988	98988	98988	98988	98988	98988	98988	
35	Pays-Bas	Combustion	200400156	135511	119	119	135392	135511	126196	135511	135511	126196	135511	135511	135511	135511	135511	135511	135511	135511	
36	Pays-Bas	Combustion	200400157	520204	50612	50612	469592	520204	443254	520204	520204	443254	520204	520204	520204	520204	520204	520204	520204	520204	
37	Pays-Bas	Combustion	200400154	131404	116678	116678	14726	131404	130933	131404	131404	130933	131404	131404	131404	131404	131404	131404	131404	131404	
38	Pays-Bas	Combustion	200400153	6166456	6324962	6324962	-158506	6166456	6189119	6166456	6166456	6189119	6166456	6166456	6166456	6166456	6166456	6166456	6166456	6166456	
39	Pays-Bas	Combustion	200400155	744953	675927	675927	69026	744953	679407	744953	744953	679407	744953	744953	744953	744953	744953	744953	744953	744953	
40	Allemagne	Combustion	14310-0506	1834	1722	1722	112	1834	2203	1834	1834	2203	1834	1834	1834	1834	1834	1834	1834	1834	
41	Allemagne	Combustion	14310-0386	130	154	154	-24	130	553	130	130	553	130	130	130	130	130	130	130	130	
42	Allemagne	Combustion	14310-0425	15319	1782	1782	13537	15319	103822	15319	15319	103822	15319	15319	15319	15319	15319	15319	15319	15319	
43	Allemagne	Combustion	14310-0349	63171	55822	55822	7349	63171	53964	63171	63171	53964	63171	63171	63171	63171	63171	63171	63171	63171	
44	Allemagne	Combustion	14310-0061	922	731	731	191	922	105	922	922	105	922	922	922	922	922	922	922	922	
45	Allemagne	Combustion	14310-0059	1051	783	783	268	1051	819	1051	1051	819	1051	1051	1051	1051	1051	1051	1051	1051	

TAB. 3.11 – Quotas distribués, émissions vérifiées et position nette courte/longue pour E.ON, Installations #1-45 (2005-2007) d'après Reuters Carbon Market Data

Liste Installation	Pays	Activité	Identifiant Permis	Quotas Dis-tribués 2005	Emissions Vérifiées 2005	Position Nette Courte/Longue 2005	Quotas Dis-tribués 2006	Emissions Vérifiées 2006	Position Nette Courte/Longue 2006	Quotas Dis-tribués 2007	Emissions Vérifiées 2007	Position Nette Courte/Longue 2007
46	Allemagne	Combustion	14310-0429	522	1523	-1001	522	2656	-2134	522	906	-384
47	Allemagne	Combustion	14310-0656	1162	1945	-783	1162	3139	-1977	1162	3322	-2160
48	Allemagne	Combustion	14310-0428	24	20	4	24	127	-103	24	19	5
49	Allemagne	Combustion	14310-0388	2915	703	2212	2915	2359	42289	2915	333	2582
50	Allemagne	Combustion	14310-0833	44700	2286	42414	44700	2411	2359	44700	5084	39616
51	Allemagne	Combustion	14310-0328	23642	18782	4860	23642	19086	4556	23642	16338	7304
52	Allemagne	Combustion	14310-0333	44734	38033	5801	44734	33482	11252	44734	30213	14521
53	Allemagne	Combustion	14310-1053	15436	12784	2652	15436	10733	4713	15436	7937	7499
54	Allemagne	Combustion	14310-0065	1766	1739	27	1766	3353	-1587	1766	1380	386
55	Allemagne	Combustion	14310-0062	921	547	374	921	992	-261	921	992	-71
56	Allemagne	Combustion	14310-0060	2296	2584	-288	2296	768	1528	2296	1846	450
57	Allemagne	Combustion	14310-0832	1618182	1926043	-307861	1618182	1692312	-74130	1618182	1703588	-85406
58	Allemagne	Combustion	14310-0424	1413422	1650808	-237386	1413422	1725278	-311856	1413422	1491266	-77844
59	Allemagne	Combustion	14310-0420	2379	5074	-2695	2379	282	2097	2379	1184	1195
60	Allemagne	Combustion	14310-0906	440237	499563	-59326	440237	282381	157856	440237	461949	-21712
61	Allemagne	Combustion	14310-0742	3552957	2610998	941959	3552957	4100667	-547710	3552957	3678763	-125806
62	Allemagne	Combustion	14310-0907	827962	858731	-30769	827962	983068	144894	827962	944942	-116980
63	Allemagne	Combustion	14310-0651	144603	143919	684	144603	90875	53728	144603	133392	11211
64	Allemagne	Combustion	14310-0550	12181	8258	3923	12181	1347	10834	12181	17522	-5341
65	Allemagne	Combustion	14310-0438	215714	260204	-44490	215714	209632	6082	215714	242358	-26644
66	Allemagne	Combustion	14310-0741	1430124	1672324	-47200	1430124	1569001	-138877	1430124	1607553	-177429
67	Allemagne	Combustion	14310-0647	1364	962	402	1364	804	560	1364	660	704
68	Allemagne	Combustion	14310-1345	2315	2858	-543	2315	2898	-583	2315	264	2051
69	Allemagne	Combustion	14310-0909	419121	286684	132437	419121	323555	95666	419121	442209	-23088
70	Allemagne	Combustion	14310-0831	4949048	6125032	-1175984	4949048	6274756	-1325708	4949048	5513703	-564655
71	Allemagne	Combustion	14310-0649	8679778	9815880	-1136102	8679778	10671936	-1992158	10929778	12646858	-1717080
72	Allemagne	Combustion	14310-0836	6269669	694416	-67447	6269669	722379	-95410	6269669	839379	-212410
73	Allemagne	Combustion	14310-0888	854487	1071534	-217047	854487	1043304	-188817	854487	1033278	-178791
74	Allemagne	Combustion	14310-1346	1076222	1174175	-97953	1076222	1025640	50582	1076222	1172046	-95824
75	Allemagne	Combustion	14310-0834	270688	427882	-157194	270688	357688	-87000	270688	439941	-169253
76	Allemagne	Combustion	14310-1347	2758879	2032467	726412	2758879	2053648	705231	2758879	2758584	295
77	Allemagne	Combustion	14310-1392	0	0	0	0	0	0	0	0	0
78	Allemagne	Combustion	14310-1348	1546	3628	-2082	1546	3665	-2119	1546	2296	-750
79	Allemagne	Combustion	14310-0390	3505642	3424354	81288	3505642	3553304	-47662	3505642	3139510	366132
80	Allemagne	Combustion	14310-0383	1669361	1972741	-303380	1669361	1798761	-129400	1669361	2019747	-350386
81	Allemagne	Combustion	14310-0708	163	825	-662	163	1154	-991	163	1786	-1623
82	Allemagne	Combustion	14330-0073	0	0	0	0	0	0	0	0	0
83	Allemagne	Combustion	14310-0745	164	776	-612	164	770	-606	164	939	-775
84	Allemagne	Combustion	14320-0002	33243	23896	9347	33243	30271	2972	33243	24361	8882
85	Allemagne	Combustion	14330-0030	32250	34936	-2686	32250	43857	-11607	32250	33547	-1297
86	Allemagne	Combustion	14310-0526	15903	3849	12054	22921	3066	19855	19412	4786	14626
87	Allemagne	Combustion	14330-0038	62217	27623	34594	62217	2696	59521	62217	315	61902
88	Allemagne	Combustion	14330-0039	2616	2269	347	2616	188	2428	2616	1844	772
89	Allemagne	Combustion	14330-0072	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total				43845592	44887326	-1041734	43852610	47268194	-3415584	46099100	48783665	-2684565

TAB. 3.12 – Quotas distribués, émissions vérifiées et position nette courte/longue pour E.ON, Installations #46-89 (2005-2007) d'après Reuters Carbon Market Data

Liste Installation	Pays	Activité	Identifiant Permis	Quotas Dis-tribués 2005		Emissions Vérifiées 2005		Position Nette Courte/Longue 2005		Quotas Dis-tribués 2006		Emissions Vérifiées 2006		Position Nette Courte/Longue 2006		Quotas Dis-tribués 2007		Emissions Vérifiées 2007		Position Nette Courte/Longue 2007	
1	Allemagne	Ceramics	14260-0013	3482	2396	2396	1086	3482	0	3482	3482	0	3482	3482	3482	3482	3482	3482	3482	3482	3482
2	Allemagne	Ceramics	14260-0057	3118	2953	2953	165	3118	2881	3118	3118	2881	237	3118	2881	3118	2881	3118	2881	237	292
3	Allemagne	Ceramics	14260-0096	5020	3314	3314	1706	5020	3412	5020	5020	3412	1608	5020	3412	5020	3412	5020	3412	1608	1164
4	Allemagne	Ceramics	14260-0111	1581	1319	1319	262	1581	1632	1581	1581	1632	-51	1581	1632	1581	1581	1632	1581	-51	350
5	Allemagne	Ceramics	14260-0112	1941	1933	1933	8	1941	1742	1941	1941	1742	199	1941	1742	1941	1941	1742	199	1819	122
6	Allemagne	Ceramics	14260-0115	54196	40715	40715	13481	54196	45701	54196	54196	45701	8495	54196	45701	54196	28060	57008	8495	-28948	110
7	Allemagne	Ceramics	14260-0116	539	493	493	46	539	431	539	539	431	108	539	431	539	539	431	108	429	110
8	Allemagne	Ceramics	14260-0118	1346	1175	1175	171	1346	1153	1346	1346	1153	193	1346	1153	1346	1346	1153	193	1194	152
9	Allemagne	Ceramics	14260-0121	13029	9814	9814	3215	13029	7524	13029	13029	7524	5505	13029	7524	13029	13029	7524	5505	6954	6075
10	Allemagne	Ceramics	14260-0129	3195	2158	2158	1037	3195	2006	3195	3195	2006	1189	3195	2006	3195	3195	2006	1189	3195	3195
11	Allemagne	Ceramics	14260-0153	336	322	322	14	336	395	336	336	395	-59	336	395	336	336	395	-59	306	30
12	Allemagne	Ceramics	14260-0155	3863	4071	4071	-208	3863	4611	3863	3863	4611	718	3863	4611	3863	3863	4611	718	-748	-466
13	Allemagne	Ceramics	14260-0169	12280	12188	12188	92	12280	11562	12280	12280	11562	718	12280	11562	12280	12280	11562	718	9255	3025
14	Allemagne	Ceramics	14260-0181	5281	3987	3987	1294	5281	3925	5281	5281	3925	5281	5281	3925	5281	5281	3925	5281	3415	1866
15	Allemagne	Ceramics	14260-0221	14301	14789	14789	-488	14301	9953	14301	14301	9953	4348	14301	9953	14301	14301	9953	4348	1235	13066
16	Allemagne	Ceramics	14260-0222	9682	10138	10138	-456	9682	1253	9682	9682	1253	8429	9682	1253	9682	9682	1253	8429	7295	2387
17	Allemagne	Ceramics	14260-0223	7103	0	0	7103	7103	0	7103	7103	0	7103	7103	0	7103	7103	0	7103	7103	7103
18	Allemagne	Ceramics	14260-0224	6420	6672	6672	-252	6420	5609	6420	6420	5609	811	6420	5609	6420	6420	5609	811	6818	-398
19	Allemagne	Paper	14280-0098	65369	55797	55797	9572	65369	56556	65369	65369	56556	8813	65369	56556	65369	65369	56556	8813	51289	14080
20	Allemagne	Paper	14280-0106	7901	4611	4611	3290	7901	4799	7901	7901	4799	3102	7901	4799	7901	7901	4799	3102	4645	3256
21	Allemagne	Combustion	14310-0055	7	0	0	7	7	0	7	7	0	7	7	0	7	7	0	7	7	7
22	Allemagne	Combustion	14310-0637	33196	13747	13747	19449	33196	14776	33196	33196	14776	18420	33196	14776	33196	33196	14776	18420	7071	26125
23	Allemagne	Combustion	14310-0680	21505	2125	2125	19380	21505	2034	21505	21505	2034	19471	21505	2034	21505	21505	2034	19471	22291	-786
24	Allemagne	Combustion	14310-0856	3240622	3388560	3388560	-147938	3240622	4351049	3240622	3240622	4351049	-1110427	3240622	4351049	3240622	3240622	4351049	-1110427	4112952	-872330
25	Allemagne	Combustion	14310-0931	2118174	3274376	3274376	-3274376	2118174	3601708	2118174	2118174	3601708	-3601708	2118174	3601708	2118174	2118174	3601708	-3601708	3061616	-3061616
26	Allemagne	Combustion	14310-0950	2118174	1738304	1738304	379870	2118174	1569243	2118174	2118174	1569243	548931	2118174	1569243	2118174	2118174	1569243	548931	1652194	465980
27	Allemagne	Combustion	14310-0952	4276832	4127851	4127851	148981	4276832	3668069	4276832	4276832	3668069	608763	4276832	3668069	4276832	4276832	3668069	608763	4239735	37097
28	Allemagne	Combustion	14310-1088	1690717	1394768	1394768	295949	1690717	1664380	1690717	1690717	1664380	26337	1690717	1664380	1690717	1690717	1664380	26337	1492609	198108
29	Allemagne	Combustion	14310-1089	1529980	1060298	1060298	469682	1529980	977009	1529980	1529980	977009	552971	1529980	977009	1529980	1529980	977009	552971	1033304	14558
30	Allemagne	Combustion	14310-1090	1669388	1634028	1634028	35360	1669388	1613914	1669388	1669388	1613914	55474	1669388	1613914	1669388	1669388	1613914	55474	1719506	-71435
31	Allemagne	Combustion	14310-1091	987205	1016733	1016733	-29528	987205	1020873	987205	987205	1020873	-33668	987205	1020873	987205	987205	1020873	-33668	1105032	-126939
32	Allemagne	Combustion	14310-1092	20318296	17573788	17573788	2744508	20318296	19317451	20318296	20318296	19317451	1000845	20318296	19317451	20318296	20318296	19317451	1000845	19599684	718612
33	Allemagne	Combustion	14310-1093	16903648	17980947	17980947	-1077299	16903648	18823349	16903648	16903648	18823349	165999	16903648	18823349	16903648	16903648	18823349	165999	16795941	107707
34	Allemagne	Combustion	14310-1094	18989348	20612731	20612731	-1623383	18989348	27336683	18989348	18989348	27336683	1280361	18989348	27336683	18989348	18989348	27336683	1280361	31252670	-2585626
35	Allemagne	Combustion	14310-1153	28667044	29734760	29734760	-1067716	28667044	11731	28667044	28667044	11731	11630	28667044	11731	28667044	28667044	11731	11630	11630	11630
36	Allemagne	Combustion	14310-1212	11630	11731	11731	-101	11630	19168	11630	11630	19168	-2060	11630	19168	11630	11630	19168	-2060	19189	-2081
37	Allemagne	Combustion	14310-1228	17108	19168	19168	-2060	17108	19139	17108	17108	19139	-2031	17108	19139	17108	17108	19139	-2031	17108	-2081

TAB. 3.13 – Quotas distribués, émissions vérifiées et position nette courte/longue pour RWE, Installations #1-37 (2005-2007) d'après Reuters Carbon Market Data

Liste Installation	Pays	Activité	Identifiant Permis	Quotas Dis-tribus 2005	Emissions Vérifiées 2005	Position Nette Courte/Longue 2005	Quotas Dis-tribus 2006	Emissions Vérifiées 2006	Position Nette Courte/Longue 2006	Quotas Dis-tribus 2007	Emissions Vérifiées 2007	Position Nette Courte/Longue 2007
38	Allemagne	Combustion	14310-1385	1063	82	981	1063	569	494	1063	308	0
39	Allemagne	Combustion	14330-0001	605912	795147	-189235	605912	828739	-222827	605912	824638	-218726
40	RU	Combustion	EA-ETCO2-0160	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	Allemagne	Combustion	14310-0054	1270	1991	-721	1270	1843	-573	1270	2761	-1491
42	Allemagne	Combustion	14310-0817	13790	8857	4933	13790	3614	10176	13790	13790	13790
43	Allemagne	Glass	14250-0093	0	0	0	0	48735	-48735	0	126621	-126621
44	Allemagne	Combustion	14310-0328	23642	18782	4860	23642	19086	4556	23642	16338	7304
45	Allemagne	Combustion	14310-0333	44734	38933	5801	44734	33482	11252	44734	30213	14521
46	Allemagne	Combustion	14310-0655	36540	44518	-7978	36540	27954	8586	36540	6771	29769
47	Allemagne	Combustion	14310-0446	37613	33104	4509	37613	26702	10911	37613	16015	21598
48	Allemagne	Combustion	14310-0060	2296	2584	-288	2296	768	1528	2296	1846	450
49	Allemagne	Ceramics	14260-0124	7869	5222	2647	7869	5159	2710	7869	4967	2902
50	Allemagne	Ceramics	14260-0125	3812	4877	-1065	3812	5204	-1392	3812	5704	-1892
51	Allemagne	Combustion	14310-0748	93963	72251	21712	93963	72554	21409	93963	69354	24609
52	Allemagne	Combustion	14310-0947	154208	107036	47172	154208	110841	43367	154208	105236	48972
53	Allemagne	Combustion	14310-0946	122999	85932	37067	122999	84859	38140	122999	79983	43016
54	Allemagne	Combustion	14310-0938	3172057	3406579	-234522	3172057	3174824	-2767	3172057	3378852	-206795
55	Allemagne	Combustion	14310-0944	3607248	3596816	10432	3607248	4324981	-717733	3607248	4775857	-1168609
56	Allemagne	Combustion	14310-0943	664401	728470	-64069	664401	726747	-62346	664401	679374	-14973
57	Allemagne	Combustion	14310-0941	3151994	2921763	230231	3151994	3779996	-628002	3151994	3671289	-519295
58	Allemagne	Combustion	14310-0945	1141834	847467	294367	1141834	725634	416200	1141834	880154	311680
59	Allemagne	Combustion	14310-0770	5264108	5017098	247010	5264108	7289168	-2025060	5264108	6925790	-1661682
60	Pays-Bas	Combustion	200400091	1349869	1106063	243806	1349869	960725	389144	1349869	1076294	273575
61	Autriche	Combustion	EMV233	0	0	0	0	0	0	0	0	0
62	Autriche	Combustion	ILE164	13942	721	13221	13942	681	13261	13942	665	13277
63	Rep Tchèque	Combustion	CZ-0055-05	2540	2198	342	2540	2772	-232	2540	1524	1016
64	Allemagne	Combustion	14330-0013	6765	25116	-18351	6765	20014	-13249	6765	11221	-4456
65	Allemagne	Combustion	14310-0165	702	212	490	702	436	266	702	218	484
66	Rep Tchèque	Combustion	CZ-0059-05	200000	85476	114524	200000	7378	192622	200000	76788	123212
67	Rep Tchèque	Combustion	CZ-0060-05	106270	46196	60074	106270	35047	71223	106270	18405	87865
68	Rep Tchèque	Combustion	CZ-0057-05	27013	1590	25423	27013	10496	16517	27013	2826	24187
69	Rep Tchèque	Combustion	CZ-0056-05	22277	1570	20707	22277	9374	12903	22277	1750	20527
70	Rep Tchèque	Combustion	CZ-0058-05	35410	23141	12269	35410	22456	12954	35410	6851	28559
71	Rep Tchèque	Combustion	CZ-0061-05	65150	17636	47514	65150	274	64876	65150	8168	56982
72	Autriche	Combustion	IVA235	0	0	0	0	0	0	0	0	0
73	Allemagne	Ceramics	14260-0172	7856	6937	919	7856	74	7782	7856	6728	1128
Total				120688330	122817125	-2133295	120688330	124473676	-3789846	120135764	128725202	-8559438

TAB. 3.14 – Quotas distribués, émissions vérifiées et position nette courte/longue pour RWE, Installations #38-73 (2005-2007) d'après Reuters Carbon Market Data

Liste Installation	Pays	Activité	Identifiant Permis	Quotas Distribués 2005		Emissions Vérifiées 2005		Position Nette Courte/Longue 2005		Quotas Distribués 2006		Emissions Vérifiées 2006		Position Nette Courte/Longue 2006		Quotas Distribués 2007		Emissions Vérifiées 2007		Position Nette Courte/Longue 2007		
				tribusés 2005	tribusés 2005	tribusés 2005	tribusés 2005	tribusés 2005	tribusés 2005	tribusés 2005	tribusés 2005	tribusés 2006	tribusés 2006	tribusés 2006	tribusés 2006	tribusés 2006	tribusés 2006	tribusés 2006	tribusés 2006	tribusés 2007	tribusés 2007	tribusés 2007
1	Espagne	Combustion	ES012101000055	1871029	1692327	178702	2077491	2536246	-458755	2128158	2423841	-295683										
2	Espagne	Combustion	ES033301000222	190493	3103188	-2912695	171950	2677815	-2505865	150230	3440880	-3290650										
3	Espagne	Combustion	ES033301000223	637005	0	637005	571919	0	571919	498618	498618	498618										
4	Espagne	Combustion	ES033301000224	1915851	0	1915851	1720099	0	1720099	1499640	1499640	1499640										
5	Espagne	Combustion	ES062401000351	3312940	4196260	-883320	2974440	3554304	-579864	2593217	3428296	-835079										
6	Espagne	Combustion	ES074501000404	0	0	0	0	401075	-401075	0	936432	-936432										
7	Espagne	Combustion	ES074501000405	106446	412660	-306214	41798	387122	-345324	0	110778	-110778										
8	Espagne	Combustion	ES074501000406	85290	266228	-180938	33492	296481	-262989	0	66894	-66894										
9	Espagne	Combustion	ES104601000666	0	0	0	0	0	0	0	741233	-741233										
10	Espagne	Combustion	ES121501000747	2786379	4221684	-1435305	2553409	3847539	-1294130	2280522	5132091	-2851569										
11	Espagne	Combustion	ES121501000748	0	0	0	0	0	0	0	0	0										
12	Espagne	Combustion	ES121501000749	140221	530469	-390248	55061	310591	-255530	0	139806	-139806										
Total				11045654	14422816	-3377162	10199659	14011173	-3811514	9150385	16420251	-7269866										

TAB. 3.15 – Quotas distribués, émissions vérifiées et position nette courte/longue pour Union Fenosa (2005-2007)
d'après Reuters Carbon Market Data

Conclusion générale

Dans le cadre des négociations internationales post-Kyoto, l'adoption de politiques publiques ambitieuses suscite une attention grandissante, étant donné les préoccupations sociétales liées à l'échelle des dommages, et aux potentielles irréversibilités du changement climatique. L'introduction d'un marché de permis d'émissions négociables en Europe le 1er janvier 2005, dans le but d'inciter les Etats-Membres à prendre des mesures d'abattement précoces, constitue une première étape importante dans cette direction. La création de l'EU ETS a en effet révélé le rôle moteur joué par l'Union Européenne dans la préservation du bien public global que constitue le climat.

Cette thèse a permis d'étudier les règles de fonctionnement du marché européen du carbone sur la période 2005-2007. Les approches théoriques et empiriques se sont révélées fructueuses pour l'analyse des mécanismes de stockage et d'emprunt de quotas, des fondamentaux du prix, et des stratégies de gestion des risques. Ces résultats nous renseignent sur l'apprentissage institutionnel ayant eu lieu durant la Phase I, à la fois du point de vue des opérateurs de marché et du régulateur.

Le Chapitre 1 fournit tout d'abord le cadre théorique pertinent à l'analyse des mécanismes de stockage et d'emprunt, en passant en revue les effets économiques et environnementaux précédemment identifiés dans la littérature. L'autorisation de ces règles de flexibilité inter-temporelle apparaît souhaitable sur un marché de quotas, car elles permettent aux firmes d'atteindre leur objectif de dépollution à moindre coût, en lissant leurs émissions dans le temps. Cependant, nous avons souligné que ces mécanismes altèrent le profil temporel et l'amplitude des dommages environnementaux. Du point de vue du régulateur, la meilleure configuration de

l'outil de flexibilité inter-temporelle consiste donc à autoriser le stockage de quotas sans restrictions, et à pénaliser l'emprunt en appliquant un taux d'échange inter-temporel non-unitaire. Nous avons ensuite concentré notre attention sur les règles de fonctionnement spécifiques adoptées sur l'EU ETS, à savoir une complète flexibilité inter-temporelle sur les périodes 2005-2007 et 2008-2012, mais une restriction sur le transfert de quotas stockés ou empruntés entre les Phases I et II. Sur la période allant du 1er juillet 2005 au 17 décembre 2007, notre étude à la Hotelling montre que l'allocation durant 2005-2007 n'a pas été optimale inter-temporellement, afin de créer la nécessaire rareté de quotas auprès des industriels conduisant à des mesures effectives d'abattement. Par ailleurs, nous identifions statistiquement la déconnexion entre les prix de première et seconde périodes, à partir du moment où les agents ont correctement intégré l'information concernant la restriction du transfert de quotas entre le 31 décembre 2007 et le 1er janvier 2008. Deux dynamiques de prix co-existent alors : une structure de prix du CO_2 décroissants asymptotiquement vers zéro jusque vers la fin de la Phase I, et des prix du CO_2 strictement croissants perceptibles à travers la structure par terme des futures de maturité durant la Phase II. Au-delà des explications précédemment identifiées par les observateurs de marché, l'inefficience du signal prix du CO_2 à refléter correctement la valeur sociale du carbone vers la fin la Phase I s'explique donc par les restrictions mises en place par les Etats-Membres concernant le transfert de quotas, empruntés ou stockés, de la Phase I vers la Phase II. Ce sacrifice de l'outil de flexibilité inter-temporelle peut être interprété par le souhait de la Commission Européenne de limiter le transfert d'inefficiences issues de la création du marché vers la Phase II, qui correspond de façon simultanée à la période d'engagement du Protocole de Kyoto. Entre les Phases II et III de l'EU ETS, les transferts de quotas sont autorisés, ce qui illustre que le phénomène d'apprentissage institutionnel a bien eu lieu.

Le Chapitre 2 s'intéresse aux fondamentaux du prix du CO_2 . Notre étude montre que les changements de prix du CO_2 s'expliquent principalement par la variation du prix des énergies, et par des changements de températures non-anticipés. Nous montrons également que leur influence varie en fonction des décisions insti-

tutionnelles, tels que l'évènement de conformité 2005 et les annonces de la Commission Européenne. Sur la période allant du 1er juillet 2005 au 30 avril 2007, nous identifions un premier changement structurel dans la série temporelle du CO_2 au mois d'avril 2006, qui correspond aux premières révélations des Etats-Membres concernant leur position nette courte/longue en terme de quotas alloués par rapport aux émissions vérifiées. Cet évènement institutionnel majeur, qui a occasionné une chute de prix de plus de 50% en quelques jours, a servi d'information fiable à l'adaptation des anticipations des agents, éliminant toute précédente information spéculative. Le second changement structurel intervient au mois d'octobre 2006, suite à l'annonce par la Commission Européenne de critères de validation plus restrictifs pour les PNAQS II. Sur la période complète, nos résultats d'estimations établissent l'influence des prix des énergies et des évènements climatiques extrêmes sur les changements de prix du CO_2 . Cette influence varie selon les sous-périodes considérées, notamment après l'évènement de conformité 2005 où les opérateurs de marché se sont retrouvés dans une position attentiste. Par la suite, nous sommes capables d'identifier à nouveau les principaux fondamentaux du CO_2 . Nous enrichissons l'approche de la littérature précédente concernant la non-linéarité de la relation entre les températures et les changements de prix du CO_2 . Le caractère novateur de notre approche est d'avoir pu établir que les déviations par rapport à la moyenne saisonnière ont plus d'importance que les températures elles-mêmes pour expliquer les changements de prix du CO_2 durant les évènements climatiques extrêmes. La suite du Chapitre 2 évalue les effets de la variation de la production industrielle dans les secteurs couverts par l'EU ETS sur les changements de prix du CO_2 . Notre analyse par décomposition montre que la position nette courte/longue des industriels d'une part, et l'évolution de leur activité mesurée par des pics de production d'autre part, permettent d'expliquer les changements de prix du CO_2 , selon la position nette d'acheteur/vendeur de quotas de l'installation sur le marché. Ces résultats valident statistiquement que l'évolution de l'activité économique puisse être considérée comme un déterminant du prix du CO_2 , alors que cet effet n'avait été que suggéré dans la littérature professionnelle jusqu'à présent. Parmi les secteurs couverts par l'EU ETS, ces résultats sont

obtenus dans ceux de la combustion, de la production de fer et d'acier, et de la production de pulpe et de papier, qui totalisent 80% de l'allocation dans l'EU ETS. Au-delà de l'effet combiné des pics de production et de la position de conformité, nous établissons la supériorité de l'effet de conformité pour expliquer les changements de prix du CO_2 . En effet, le secteur de la combustion est le seul à avoir été caractérisé par une position nette courte, tandis que les deux autres secteurs enregistrent les positions les plus longues dans l'EU ETS sur la période 2005-2006. Enfin, nous étendons cette analyse par pays. Cette étude valide l'impact de la variation de la production industrielle sur les changements de prix du CO_2 pour quatre pays (l'Allemagne, l'Espagne, la Pologne et le Royaume-Uni), et souligne le rôle central joué par les producteurs électriques allemands.

Le Chapitre 3 détaille les stratégies de gestion des risques dans l'EU ETS. Suivant la méthodologie utilisée sur les marchés d'action, nous inférons l'aversion au risque des investisseurs autour de l'évènement de conformité 2006, à partir de la relation existant avec les probabilités risque-neutre et historique. Cette méthode s'est avérée robuste sur les marchés d'actions. Pour estimer la probabilité risque neutre, nous utilisons une nouvelle base de données de prix d'options, lancée en octobre 2006 sur ECX, avec comme actif sous-jacent un quota de CO_2 valide durant les Phases I et II. Nous inférons la distribution risque-neutre moyenne de façon non-paramétrique à partir des séries de volatilité implicites. Ensuite, nous utilisons les séries de prix futures des contrats de maturité décembre 2008 et décembre 2009 pour modéliser la distribution historique, à partir d'un modèle GARCH asymétrique semi-paramétrique. Sur l'ensemble de la base de données allant du 1er octobre 2006 au 23 novembre 2007, nous choisissons de découper notre base de données en deux sous-échantillons avant et après l'évènement de conformité 2006, qui constitue le seul évènement empiriquement observable. Nos résultats illustrent les profonds changements dans l'aversion au risque des investisseurs autour de cet évènement annuel. En effet, nous mettons en évidence que la volatilité est plus faible après l'annonce de la Commission Européenne, ce qui est conforme au rôle attendu de la diffusion d'informations sur les marchés financiers. De façon plus originale, nous montrons que le risque associé au contrat

d'option consiste dans des prix croissants de quotas de CO₂ après l'évènement de conformité 2006, à l'inverse de l'effet de levier observé sur un marché standard de matière première. Ce résultat s'inscrit dans la logique d'une rareté plus importante de quotas attendue par les investisseurs dans le moyen-terme, qui se reflète également dans la structure par terme des futures. Nous disposons ainsi d'un outil efficace permettant de quantifier les effets de l'aversion au risque sur le marché européen du carbone qui, sur la période considérée, s'est avérée plus élevée que sur les marchés d'action. Cette première étude souligne la nécessité pour les investisseurs de gérer adéquatement le risque lié à la détention de quotas. En lien avec le Chapitre 1, nous examinons dans une deuxième section les conséquences de l'incertitude liée aux variations des décisions politiques sur le comportement des firmes sur deux périodes, lorsque celles-ci ont la possibilité de stocker, et que l'échange de quotas entre firmes a déjà eu lieu. En présence d'une augmentation du niveau de risque préservant la moyenne, nous montrons que le comportement de stockage de la firme est lié au signe de la dérivée tierce de la fonction de production par rapport aux émissions. Nous détaillons l'utilisation des inputs de la firme en réponse à une augmentation du risque. Concernant la règle optimale de partage des risques, nous établissons qu'une agence peut effectuer un lissage des quotas en lieu et place des firmes lorsque la somme des dotations est connue, quelles que soient les modifications de règle d'allocation souhaitées par le régulateur. Lorsque le nombre de quotas distribués en seconde période est aléatoire, cette condition de partage tient compte de la sensibilité de la productivité marginale de la firme au nombre de quotas. Ces résultats sont finalement illustrés dans le cadre du comportement de stockage des installations, et de mutualisation des quotas entre filiales et maison mères dans l'EU ETS, soulignant l'efficacité du stockage de quotas en tant qu'outil de gestion des risques.

Au total, nos travaux témoignent des difficultés rencontrées suite à la création de l'EU ETS pour atteindre un signal prix cohérent avec des réductions d'émissions effectives par les industriels. Les erreurs de jeunesse du marché européen du carbone, liées à l'allocation initiale ou au transfert de quotas inter-périodes, semblent avoir été corrigées pour la période 2008-2012, limitant ainsi le transfert d'ineffi-

ciences vers la Phase II.

Les limites, choisies ou imposées, de ce présent travail, suggèrent bien entendu autant de pistes de recherche. Dans un contexte institutionnel mouvant, l'évaluation exhaustive de la Phase I de l'EU ETS nécessite l'accès à des données de vérification des émissions au niveau des firmes, rendant ainsi souhaitable le prolongement de l'analyse du Chapitre 2 au niveau micro-économétrique. Par ailleurs, il serait intéressant de répliquer l'analyse du Chapitre 3 autour d'autres événements susceptibles d'affecter l'aversion au risque des investisseurs, tels que des chocs sur les marchés de l'énergie, ou si la Commission Européenne communique de façon semestrielle par exemple. Une dimension importante en extension de ce travail consiste également à étudier les primes de risque sur le marché du carbone. Enfin, nous avons seulement esquissé une description du comportement de mutualisation des quotas à la fin du Chapitre 3. Une piste de recherche future prend sa source dans la compilation préalable des données du CITL entre filiales et maison-mère.

Bibliographie

- [1] Aït-Sahalia, Y., Lo, A.W. 2000. Nonparametric Risk Management and Implied Risk Aversion. *Journal of Econometrics* ; 94, 9–51.
- [2] Alberola, E., Chevallier, J., Cheze, B., 2008. Price Drivers and Structural Breaks in European Carbon Prices 2005-2007. *Energy Policy* 36(2), 787–797.
- [3] Alberola, E., Chevallier, J., Cheze, B., 2008. The EU Emissions Trading Scheme : Disentangling the Effects of Industrial Production and CO₂ Emissions on Carbon Prices. *EconomiX Working Paper Series*, # 2008-12.
- [4] Alberola, E., Chevallier, 2007. European Carbon Prices and Banking Restrictions : Evidence from Phase I (2005-2007). *EconomiX Working Paper Series*, # 2007-32.
- [5] Andersen, A. B., Wagener, T. 2002. Extracting Risk Neutral Probability Densities by Fitting Implied Volatility Smiles : Some Methodological Points and an Application to the 3M Euribor Futures Options Prices. *ECB Working Paper Series*.
- [6] Arrow, K.J. 1964. The Role of Securities in the Optimal Allocation of Risk-Bearing. *Review of Economic Studies*, 31, 91–96.
- [7] Babiker, M., Reilly, J., Viguier, L. 2004. Is International Emissions Trading Always Beneficial? *The Energy Journal*, 25 (2), 33–56.
- [8] Baron, R. 1999. Market Power and Market Access in International GHG Emis-

- sion Trading. *IEA Information Paper*. International Energy Agency, Energy and Environment Division.
- [9] Barone-Adesi, G., Engle, R.F., Mancini, L. 2008. A GARCH Option Pricing Model with Filtered Historical Simulation. *The Review of Financial Studies*, 21, 1223–1258.
- [10] Baumol W. and Oates W. E. 1998. *The Theory of Environmental Policy*, Cambridge, Cambridge University Press.
- [11] Ben-David, S., Brookshire, D.S., Burness, S., McHee, M., Smidt C. 1999. Heterogeneity, Irreversible Production Choice, and Efficiency in Emission Permits Markets, *Journal of Environmental Economics and Management*, 38, 176–194.
- [12] Benz, E., Truck, S. 2006. Modeling the Price Dynamics of CO₂ Emission Allowances. *Energy Economics*, forthcoming.
- [13] Bernard, A., Paltsev, S., Reilly, J.M., Vielle, M., Viguier, L. 2003. Russia's Role in the Kyoto Protocol. *MIT Joint Program on the Science of Policy and Global Change*, 98.
- [14] Berndt, E.K., Robert, E., Hall, B.H., Hausman, J.A. 1974. Estimation and Inference in Nonlinear Structural Models. *Annals of Economic and Social Measurement* ; 3 ; 653–665.
- [15] Bertholon, H., Monfort, A., Pegoraro, F. 2007. Econometric Asset Pricing Modelling. CREST Working Paper, Paris.
- [16] Bessec, M., Fouquau, J. 2008. The Non-Linear Link between Electricity Consumption and Temperature in Europe : A Threshold Panel Approach. *Energy Economics*, 30(5), 2705–2721.
- [17] Bessembinder, H., Coughenour, J.F., Seguin, J.P., Monroe-Smoller, M. 1995. Mean Reversion in Equilibrium Asset Prices : Evidence from the Futures Term Structure. *The Journal of Finance*, 5(1), 361–375.

- [18] Biglaiser G., Horowitz J., and Quiggin J. 1995. Dynamic Pollution Regulation. *Journal of Regulatory Economics* 8, 33–44.
- [19] Bohm, P., Russel, C. S. 1985. *Comparative Analysis of Alternative Policy Instruments*, in *Handbook of Natural Resources and Energy Economics*, Kneese, A.V., Sweeny, J.L. (eds), New-York, North-Holland, 395–455.
- [20] Bohringer, C., Loshel, A. 2003. Market Power and Hot Air in International Emissions Trading : the Impact of the US Withdrawal from the Kyoto Protocol. *Applied Economics*, 35(6), 651–663.
- [21] Bollerslev, T., 1986. Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity. *Journal of Econometrics* 31, 307–327.
- [22] Boltanski, L., Thevenot, L. 1991. *De la justification : les économies de la grandeur*, editions Gallimard.
- [23] Borak, S., Hardle, W., Truck, S., Weron, R. 2006. Convenience Yields for CO₂ Emission Allowance Futures Contracts. SFB 649 Discussion Paper, 076, Humboldt Universitat, Berlin.
- [24] Borch K. 1962. Equilibrium in a Reinsurance Market, *Econometrica*, 30, 424–444.
- [25] Bosetti V., Carraro C., Galeotti M., Massetti E. and Tavoni M. 2006. WITCH : A World Induced Technical Change Hybrid Model. *The Energy Journal*, Special Issue on Hybrid Modeling of Energy-Environment Policies : Reconciling Bottom-up and Top-down, 13-38.
- [26] Bosetti V., Carraro C. and Massetti E. 2008. Banking Permits : Economic Efficiency and Distributional Effects, *Working Papers Fondazione Enrico Mattei* # 2008.1.
- [27] Brennan, M. 1958. The Supply of Storage. *American Economic Review*, 48, 50–72.

- [28] Brennan, M. 1991. The Price of Convenience and the Pricing of Commodity Contingent Claims. in Lund, D., Oksendal, B. Stochastic Models and Option Values; Elsevier; New York.
- [29] Briere, M. 2006. Market Reactions to Central Bank Communication Policies : Reading Interest Rate Options Smiles. Working Papers CEB; 06-009.
- [30] Brockmann, M., Gasser, T., Herrman, E. 1993. Locally Adaptive Bandwidth Choice for Kernel Regression Estimators. Journal of the American Statistical Association; 88, 1302–1309.
- [31] Brown, S.P.A., Yucel, M.K., 2008. What Drives Natural Gas Prices?. The Energy Journal 29(2), 45–60.
- [32] Bunn, D., Fezzi, C., 2007. Interaction of European Carbon Trading and Energy Prices. Fondazione Eni Enrico Mattei working paper 123.
- [33] Burniaux, J.M., 1999. How important is market power in achieving Kyoto? : An assessment based on the GREEN model. OECD Workshop on the Economic Modelling of Climate Change.
- [34] Breeden, D.T., Litzenberger, R.H. 1978. Prices of State-Contingent Claims Implicit in Option Prices. The Journal of Business, 51(4), 621–651.
- [35] Carbon Trust, 2004. *The European Emissions Trading Scheme : Implications for Industrial Competitiveness*, Report.
- [36] Carbon Trust, 2005. *The UK Climate Change Programme : Potential Evolution for the Business and Public Sector*, Report.
- [37] Cason, T.N., Gangadharan, L. 2006. Emissions Variability in Tradable Permit Markets with Imperfect Enforcement and Banking. Journal of Economic Behavior and Organization 61(2), 199–216.
- [38] Chesney, M., Taschini, L. 2008. The Endogenous Price Dynamics of the Emission Allowances : an Application to CO₂ Option Pricing. Swiss Finance Institute Research Paper Series, 08-02.

- [39] Chevalier, J.M., Percebois, J., 2008. Gas and Electricity : A Challenge for Europe and for France. French Economic Analysis Council, Report VII-2, Paris.
- [40] Chevallier J., Ielpo F., and Mercier L. 2008. Risk Aversion and Institutional Information Disclosure on the European Carbon Market : a Case-Study of the 2006 Compliance Event, *Energy Policy*, doi :10.1016/j.enpol.2008.07.030.
- [41] Christiansen, A., Arvanitakis, A., Tangen, K., Hasselknippe, H., 2005. Price determinants in the EU emissions trading scheme. *Climate Policy* 5, 15–30.
- [42] Cochrane, J., 2002. *Asset Pricing*. Princeton University Press.
- [43] Cont, R., da Fonseca, J. 2002. Dynamics of Implied Volatility Surfaces. *Quantitative Finance*, 2, 45–60.
- [44] Convery, F.J., Redmond, L., 2007. Market and Price Developments in the European Union Emissions Trading Scheme. *Review of Environmental Economics and Policy* 1, 88–111.
- [45] Cronshaw, M.B., Kruse, J.B. 1996. Regulated Firms in Pollution Permit Markets with Banking, *Journal of Regulatory Economics*, 9(2), 179–189
- [46] Cropper M. L. and Oates W. E.,(1992), *Environmental Economics : a Survey*, *Journal of Economics Literature*, 30, 675–740.
- [47] Decaux, A., Ellerman, A.D., 1998. Analysis of Post-Kyoto CO2 Emissions Trading Using Marginal Abatement Curves. MIT EPPR Report #40.
- [48] Demailly, D., Quirion, P., 2008. European Emission Trading Scheme and Competitiveness : a Case Study on the Iron and Steel Industry. *Energy Economics* 30(4), 2009–2027.
- [49] Demailly, D., Quirion, P., 2008. Leakage from Climate Policies and Border Tax Adjustment : Lessons from a Geographic Model of the Cement Industry, forthcoming in Roger Guesnerie and Henry Tulkens, editors, *The Design of Climate Policy*, papers from a Summer Institute held in Venice, CESifo Seminar Series, Boston : The MIT Press.

- [50] Diakoulaki, D., Mandaraka, M., 2007. Decomposition Analysis for Assessing the Progress in Decoupling Industrial Growth from CO₂ Emissions in the EU Manufacturing Sector. *Energy Economics* 29(4), 636–664.
- [51] Dinan, T., Rogers, D.L., 2002. Distributional Effects of Carbon Allowance Trading : How Government Decisions Determine Winners and Losers. *National Tax Journal* 5(2), 199–221.
- [52] Dockner, E., Jorgensen, S., Long, N. Van., Sorger, G., 2000. *Differential Games in Economics and Management Science*. Cambridge University Press.
- [53] Ehrhart, K.M., Hoppe, C., Schleich, J., Seifert, S. 2005. The Role of Auctions and Forward Markets in the EU ETS : Counterbalancing the Cost-Inefficiencies of Combining Generous Allocation with a Ban on Banking. *Climate Policy*, 5, 31–46.
- [54] Ehrhart K.M., Hoppe C. et Loschel R. 2008. Abuse of EU Emissions Trading for Tacit Collusion, *Environmental and Resource Economics*, 41, 347–361.
- [55] Ekins, P., Barker, T. 2001. Carbon Taxes and Carbon Emissions Trading. *Journal of Economic Surveys*, 15(3), 325–376.
- [56] Ellerman, A.D., Joskow, P.L., Schmalensee, R., Montero, J.P., Bailey, E., 2000. *Markets for Clean Air : The US Acid Rain Program*, Cambridge University Press.
- [57] Ellerman, A.D., Wing, I.Sue., 2003. Absolute versus Intensity-Based Emission Caps. *Climate Policy* 3, S7–S20.
- [58] Ellerman, A.D., Buchner, B.K., 2007. The European Union Emissions Trading Scheme : Origins, Allocation, and Early Results. *Review of Environmental Economics and Policy* 1, 66–87.
- [59] Ellerman, A.D., Buchner, B.K. 2008. Over-Allocation or Abatement ? A Preliminary Analysis of the EU ETS Based on the 2005-06 Emissions Data. *Environmental and Resource Economics*, doi :10.1007/s10640-008-9191-2.

- [60] Ellerman, A.D., Montero, J.P., 2007. The Efficiency and Robustness of Allowance Banking in the U.S. Acid Rain Program. *The Energy Journal* 28(4).
- [61] Ellerman, A.D. 2008. New Entrant and Closure Provisions : How do they Distort ? *The Energy Journal* 29, Special Issue.
- [62] Ellerman, A.D., Buchner, B.K., Carraro, C., 2008. *Allocation in the European Emissions Trading Scheme : Rights, Rents and Fairness*, Cambridge University Press.
- [63] Etner J. et Jouvét P.A. 2000. Investment Choice with Polluted Capital, *Australian Economic Papers* 39(4), 465–482.
- [64] Eurostat, 2007. Statistical Data on Monthly Production Index. Statistical Office of the European Communities, Brussels. Available at <http://ec.europa.eu/eurostat>. Cited January 2008.
- [65] Fama, E., French, K.R. 1987. Commodity Futures Prices : Some Evidence on Forecast Power, Premiums, and the Theory of Storage. *Journal of Business*; 60(1); 55–73.
- [66] Fama, E., French, K.R. 1988. Business Cycles and the Behavior of Metal Prices. *Journal of Finance*, 43(5), 1075–1093.
- [67] Glosten, L.R., Jagannathan, R., Runkle, D.E. 1993. On the Relation between the Expected Value and the Volatility of the Nominal Excess Return on Stocks. *Journal of Finance*, 48, 1779–1801.
- [68] Godby, R.W., 2000. Market Power and Emissions Trading : Theory and Laboratory Results. *Pacific Economic Review* 5(3), 349–363.
- [69] Godby, R.W., Mestelman, S., Muller, R.A., Welland, J.D. 2000. Emissions Trading with Shares and Coupons when Control of Discharges is Uncertain. *Journal of Environmental Economics and Management*, 32, 359–381.
- [70] Gollier, C. 2001. *The Economics of Risk and Time*, The MIT Press, Massachusetts Institute of Technology.

- [71] Gouriéroux, C., Monfort, A., Trognon, A. 1984. Pseudo Maximum Likelihood Methods : Theory. *Econometrica*, 52, 680–700.
- [72] Gouriéroux, C., Monfort, A. 2007. Econometric Specification of Stochastic Discount Factor Models. *Journal of Econometrics*, 127(2), 509–530.
- [73] Green, W.H. 2000. *Econometric Analysis*. Fourth Edition ; Prentice Hall International.
- [74] Greening, L.A., Davis, W.B., Schipper, L., 1998. Decomposition of Aggregate Carbon Intensity for the Manufacturing Sector : Comparison of Declining Trends from 10 OECD Countries for the Period 1971-1991. *Energy Economics* 20(1), 43–65.
- [75] Hahn, R.W., 1984. Market Power and Transferable Property Rights. *Quarterly Journal of Economics* 99, 753–765.
- [76] Hahn R.,(1989), Economics Prescription for Economic Problems : How the Patient Followed the Doctor's Orders, *Journal of Economic Perspectives*, 3, 252–262.
- [77] Haites, E. 2006. *Allowance Banking in Emissions Trading Schemes : Theory and Practice*. Margaree Consultants Inc., Toronto.
- [78] Hall, A. 2005. *The Generalized Method of Moments*. Oxford University Press.
- [79] Harrison, D. 2003. Ex Post Evaluation of the RECLAIM Emissions Trading Program for the Los Angeles Air Basin. *OECD Workshop on Ex Post Evaluation of Tradable Permits : Methodological and Policy Issues*.
- [80] Heal, G. 2007. A Celebration of Environmental and Resource Economics. *Review of Environmental Economics and Policy*, 1, 7–24.
- [81] Helfand, G.E., Moore, M.R., Liu, Y., 2006. Testing for Dynamic Efficiency of the Sulfur Dioxide Allowance Market. University of Michigan Working Paper.

-
- [82] Helm D., Hepburn C., et Mash R. 2003. Credible Carbon Policy. *Oxford Review of Economic Policy* 19(3), 438–450.
- [83] Hotelling, H. 1931. The Economics of Exhaustible Resources. *Journal of Political Economy*, 39, 137–175.
- [84] Holtsmark, B. 2003. Russian Behaviour in the Market for Permits under the Kyoto Protocol. *Climate Policy*, 3, 399–415.
- [85] IEEE, 1979. *Programs for Digital Signal Processing*. John Wiley and Sons.
- [86] Ielpo, F., Guégan, D. 2008. Flexible Time Series Models for Subjective Distribution Estimation with Monetary Policy in View. *Brussel Economic Review*, forthcoming.
- [87] Jacoby, H.D., Ellerman, A.D. 2004. The Safety Valve and Climate Policy. *Energy Policy* 32, 481–491.
- [88] Jackwerth, J.C. 2000. Recovering Risk Aversion from Option Prices and Realized Returns. *The Review of Financial Studies*, 13(2), 433–451.
- [89] Jouvét, P.A., Michel, P., Rotillon, G. 2005. Optimal Growth with Pollution : How to Use Pollution Permits? *Journal of Economic Dynamics and Control*, 29, 1597–1609.
- [90] Jouvét, P.A., Michel, P., Rotillon, G. 2005. Equilibrium with a Market of Permits. *Research in Economics*, 59, 148–163.
- [91] Joskow P.L., 1990. The Performance of Long-Term Contracts : Further Evidence from Coal Markets. *The RAND Journal of Economics* 21 (2), 251–274.
- [92] Jurczenko, E., Maillet, B., Negrea, B. 2001. A Note on Skewness and Kurtosis Adjusted Option Pricing Models under the Martingale Restriction. *Quantitative Finance*, 21, 479–499.
- [93] Kanen J.L.M., 2006. *Carbon Trading and Pricing*. Environmental Finance Publications.

- [94] Karp, L., Newbery, D.M., 1993. Intertemporal Consistency Issues in Depletable Resources in Handbook of Natural Resource and Energy Economics, vol. III, edited by Kneese, A.V., Sweeney, J.L., Chapter 19, 881–931.
- [95] Kling, C., Rubin, J., 1997. Bankable Permits for the Control of Environmental Pollution. *Journal of Public Economics* 64, 101–115.
- [96] Korppoo, A., Karas, J., Grubb, M. 2006. *Russia and the Kyoto Protocol : Opportunities and Challenges*. Royal institute of international affairs edn. Chatham House.
- [97] Koutstaal, P. 1997. *Economic Policy and Climate Change : Tradable Permits for Reducing Carbon Emissions*, Edward Elgar.
- [98] Kronenberg, T., 2006. Should we worry about the failure of the Hotelling rule? Working Paper, Maastricht University.
- [99] Lee, J., Strazicich, M.C., 2001. Testing the Null of Stationarity in the Presence of a Structural Break. *Applied Economics Letters* 8, 377–382.
- [100] Lee, J., Strazicich, M.C., 2003. Minimum LM Unit Root Test with Two Structural Breaks. *Review of Economics and Statistics* 85 (4), 1082–1089.
- [101] Leseur, A., Trotignon, R., Redmond, L., 2007. A Review of the 2005 and 2006 Compliance of Installations from the CITL Data. Caisse des Dépôts–Climate Task Force Research Report.
- [102] Leiby, P., Rubin, J., 2001. Intertemporal Permit Trading for the Control of Greenhouse Gas Emissions. *Environmental and Resource Economics* 19, 229–256.
- [103] Leland, H.E. 1980. Who Should Buy Portfolio Insurance? *The Journal of Finance*, 35(2), 581–594.
- [104] Leston, D. 1992. Investment Decisions and Transferable Discharge Permits : an Empirical Study of Water Quality Management under Policy Uncertainty, *Environmental and Resource Economics*, 2, 441–458.

- [105] Liaskas, K., Mavrotas, G., Mandaraka, M., Diakoulaki, D., 2000. Decomposition of industrial CO₂ emissions : The case of European Union. *Energy Economics* 22(4), 383–394.
- [106] Li, X., Sailor, D.J. 1995. Electricity Use Sensitivity to Climate and Climate Change. *World Resource Review* 7 (3), 334–346.
- [107] Liski, M., Montero, J.P., 2005. A Note on Market Power in an Emissions Permit Market with Banking. *Environmental and Resource Economics* 31(2), Special Issue, 159–173.
- [108] Liski, M., Montero, J.P. 2006. On Pollution Permit Banking and Market Power. *Journal of Regulatory Economics* 29 (3), 283–302.
- [109] Loschel, A., Zhang, Z.X., 2002. The Economic and Environmental Implications of the US Repudiation of the Kyoto Protocol and the Subsequent Deals in Bonn and Marrakech. *FEEM Nota Di Lavoro #23.2002*.
- [110] Lucas, R. 1978. Asset Prices in an Exchange Economy; *Econometrica*, 46, 1429–1445.
- [112] Maeda, A., 2003. The Emergence of Market Power in Emission Rights Markets : the Role of Initial Permit Distribution. *Journal of Regulatory Economics* 24(3), 293–314.
- [112] Maeda, A. 2004. Impact of Banking and Forward Contracts on Tradable Permit Markets. *Environmental Economics and Policy Studies* 6(2), 81–102.
- [113] Mansanet-Bataller, M., Pardo, A., Valor, E., 2007. CO₂ Prices, Energy and Weather. *The Energy Journal* 28 (3), 67–86.
- [114] McKinsey, Ecofys 2006. *EU ETS Review : Report on International Competitiveness*. Conducted for European Commission DG Environment.
- [115] MEDAD, 2007. *Gaz Naturel en France : Les Principaux Résultats en 2006*. Energy Observatory, French Ministry of Ecology and Sustainable Development, DGEMP, Paris, France.

- [116] Misiolek, W.S., Elder, H.W., 1989. Exclusionary Manipulation of Markets for Pollution Rights. *Journal of Environmental Economics and Management* 16, 156–166.
- [117] Montgomery, W.D., 1972. Markets in Licenses and Efficient Pollution Control Programs. *Journal of Economic Theory* 5, 395–418.
- [118] Newbery, D.M. 2008. Climate Change Policy and Its Effect on Market Power in the Gas Market, *Journal of the European Economic Association*, 6(4), 727–751.
- [119] Newell, R., Pizer, W., Zhang, J., 2000. Managing Permit Markets to Stabilize Prices. *Environmental and Resource Economics* 31, 133–157.
- [120] Noll, R.G., 1982. Implementing Marketable Emissions Permits. *The American Economic Review* 72, 120–124.
- [121] Paolella, M.S., Taschini, L. 2008. An Econometric Analysis of Emission Trading Allowances. *Journal of Banking and Finance* 32(10), 2022–2032.
- [122] Pearce, D.W., Turner, R.K. 1990. *Economic of Natural Resources and the Environment*, Harvester Wheatsheaf.
- [123] Perron, P. 1989. The Great Crash, the Oil Price Shock, and the Unit Root Hypothesis. *Econometrica*, 57 (6), 1361–1401.
- [124] Petrakis, E., Sartzetakis, E.S., Xepapadeas, A., 1999. *Environmental Regulation and Market Power : Competition, Time Consistency and International Trade*. Edward Elgar.
- [125] Pindyck, R.S. 1993. The Present Value Model of Rational Commodity Pricing. *The Economic Journal*, 103, 511–530.
- [126] Pindyck, R.S. 1994. Inventories and the Short-Run Dynamics of Commodity Prices. *Rand Journal of Economics*, 25(1), 141–159.

- [127] Pratt, J.W. 1964. Risk Aversion in the Small and in the Large. *Econometrica*, 32, 122–136.
- [128] Raymond, L., 1996. Private Rights in Public Resources : Equity and Property Allocation in Market-Based Environmental Policy. *Resources For The Future*.
- [129] Reinaud, J., 2007. *CO₂ Allowance and Electricity Price Interaction : Impact on Industry's Electricity Purchasing Strategies in Europe*. IEA Information Paper.
- [130] Rosenberg, J.V., Engle, R.F. 2002. Empirical Pricing Kernels. *Journal of Financial Economics* ; 64 ; 341–372.
- [131] Rothschild, M., Stiglitz, J.E. 1971. Increasing Risk : I. A Definition, *Journal of Economic Theory*, 2(3), 225–243.
- [132] Rubin, J. 1996. A model of Intertemporal Emission Trading, Banking, and Borrowing. *Journal of Environmental Economics and Management*, 31, 269–286.
- [133] Sandel, M.J. 1997. It's Immoral to Buy the Right to Pollute (with replies). *New York Times*, Dec. 15, A29.
- [134] Schennach S.M., 2000. The Economics of Pollution Permit Banking in the Context of Title IV of the 1990 Clean Air Act Amendments. *Journal of Environmental Economics and Management*, 40, 189–210.
- [135] Seifert, J., Uhrig-Homburg, M., Wagner, M. 2008. Dynamic Behavior of CO₂ Spot Prices. *Journal of Environmental Economics and Management*, forthcoming.
- [136] Schleich, J., Ehrhart, K.M., Hoppe, C., Hoppe, C., Seifert, S. 2006. Banning Banking in EU Emissions Trading?. *Energy Policy*, 34, 112–120.
- [137] Sijm, J.P.M., Neuhoff, K., Chen, Y. 2006. *CO₂ Cost Pass-Through and Windfall Profits in the Power Sector*, *Climate Policy* 6(1), 49–72.

- [138] Slade, M.E., Thille, E. 1997. Hotelling Confronts CAPM : A Test of the Theory of Exhaustible Resources. *The Canadian Journal of Economics*, 30 (3), 685–708.
- [139] Smale, R., Hartley, M., Hepburn, C., Ward J., Grubb M. 2006. The Impact of CO_2 Emissions Trading on Firm Profits and Market Prices, *Climate Policy* 6(1), 31–48.
- [140] Springer, U., 2003. The market for tradable GHG permits under the Kyoto Protocol : a survey of model studies. *Energy Economics* 25 (5), 527–551.
- [141] Stavins R.N., (1995), Transaction Costs and Tradable Permits, *Journal of Environmental Economics and Management*, 29, 133–148.
- [142] Stavins R.N., (1998), What Can We Learn from the Grand Policy Experiment ? Lessons from SO_2 Allowance Trading. *The Journal of Economic Perspectives*, 12 (3), 69–88
- [143] Trotignon, R., McGuiness, M., 2007. Technical Memorandum on Analysis of the EU ETS Using the Community Independent Transaction Log. MIT-CEEPR Working Paper 2007-012.
- [144] Trotignon, R., McGuiness, M., Delbosc, A., 2008. European CO_2 Market and the CITL : The Trial Period Under Scrutiny. Research Report, Mission Climat, Caisse des Dépôts, Paris, forthcoming.
- [145] Uhrig-Homburg, M., Wagner, M. 2007. Derivative Instruments in the EU Emissions Trading Scheme - An Early Market Perspective. Working Paper ; Chair of Financial Engineering and Derivatives, Universität Karlsruhe.
- [146] UNFCCC. 2000. *Procedures and Mechanisms Relating to Compliance under the Kyoto Protocol : Note by the co-Chairmen of the Joint Working Group on Compliance*, Bonn. Report.
- [147] Von der Fehr N.H. 1993. Tradeable Emissions Rights and Strategic Interaction. *Environmental and Resource Economics* 3, 129–151.

-
- [148] Walker, N. 2006. Concrete Evidence? An Empirical Approach to Quantify the Impact of EU Emissions Trading on Cement Industry Competitiveness. School of Geography, Planning and Environmental Policy, University College Dublin. Working Paper.
- [149] Weitzman, M.L. 1974. Prices vs. Quantities. *Review of Economic Studies*, 41, 477–491.
- [150] Working, H. 1949. The Theory of the Price of Storage. *American Economic Review*, 12, 1254–1262.
- [151] Wossink, A., Gardebroek, C. 2006. Environmental Policy Uncertainty and Marketable Permit Systems : the Dutch Phosphate Quota Program, *American Journal of Agricultural Economics*, 88, 16–27.
- [152] Zakoian, J.M., 1994. Threshold Heteroskedastic Models. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 18 (5), 931–944.