



**HAL**  
open science

# Analyse multi-échelle du comouvement entre les prix du quota carbone, du crédit carbone, et des produits énergétiques

Clarda Nsouadi

► **To cite this version:**

Clarda Nsouadi. Analyse multi-échelle du comouvement entre les prix du quota carbone, du crédit carbone, et des produits énergétiques. Economies et finances. Université Montpellier, 2016. Français. NNT : 2016MONTD052 . tel-01579335

**HAL Id: tel-01579335**

**<https://theses.hal.science/tel-01579335>**

Submitted on 30 Aug 2017

**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.

# THÈSE

Pour obtenir le grade de  
Docteur

Délivré par **Université de Montpellier**

Préparée au sein de l'école doctorale d'Economie et de  
Gestion  
Et du Laboratoire Montpellierain d'Economie Théorique et  
Appliquée (LAMETA)

Spécialité : **Sciences Economiques**

Présentée par **Nsouadi Ange**

**Analyse Multi-échelle du comouvement  
entre les prix du quota carbone, du crédit  
carbone, et des produits énergétiques**

Soutenue le 21 Juin 2016 devant le jury composé de

<b>Mme. Anne PEGUIN-FEISSOLLE</b> , Directeur de Recherches, CNRS, GREQAM	Rapporteur
<b>M. Zied Ftiti</b> , Professeur des Universités - EDC Paris Business School	Rapporteur
<b>Mme Maria Mansanet-Bataller</b> , Maitre de conférences, Université de France-Compté	Examinatrice
<b>M. Stéphane Mussard</b> , Professeur d'Université de Nîmes	Examinateur
<b>M. Michel Terraza</b> , Professeur d'Université Montpellier	Directeur de thèse
<b>M. Jules Sadefo Kamdem</b> , Professeur d'Université de Guyane	Co-directeur de thèse



« L'Université n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse ; ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur ».

---

# RESUMÉ

Notre thèse est une contribution à la compréhension de la structure du prix du quota carbone, à l'analyse de sa fluctuation, et aux interactions pouvant exister entre d'une part le système communautaire d'échange de quotas d'émission (SCEQE) et le mécanisme pour le développement propre (MDP) et d'autre part entre le marché du quota carbone et ceux du secteur de l'énergie.

Pour réaliser cet objectif, nous faisons appel à l'approche temps-fréquence (ondelettes) qui permet d'analyser le comportement local d'un signal, en isolant les composantes relatives aux fréquences de trading des agents. Cette méthode permet de décomposer la variance d'une série chronologique en différentes composantes fréquentielles dont on peut suivre les évolutions au cours du temps. Les horizons temporels de placement sont affectés à chaque bande de fréquences liés à un degré de risque du marché. Les bandes à haute fréquence obtenues par la décomposition en ondelettes renferment l'information relative à la structure de la série chronologique à court terme et non ; celle à moyenne et à basse fréquence capturent respectivement les structures de la série chronologique à moyen et long terme.

Pour concrétiser notre apport nous proposons un développement de notre recherche en 3 chapitres.

---

Le premier présente le marché carbone, sa création, son fonctionnement, et les différents acteurs qui l'animent. La formation du prix du CO<sub>2</sub>, son évolution et ses facteurs déterminants.

Le deuxième développe une analyse multidimensionnelle du comouvement entre le prix du quota (SCEQE) et du crédit carbone (MDP) selon deux hypothèses :

la première est l'homogénéité du comportement des agents. La relation de comouvement entre le prix du quota (SCEQE) et du crédit carbone (MDP) suppose que les intervenants sur le marché disposent d'une même stratégie d'investissement. On utilise dans ce cas les outils économétriques standards (Analyse de la Cointégration, de la causalité, modélisation vecteur Autorégressif). Nous mettons en évidence l'existence d'une causalité unidirectionnelle du CER vers l'EUA conforme aux faits observés de l'accélération du mécanisme pour le développement propre (MDP). En effet les industriels portent un grand intérêt sur le MDP, et cela a eu un impact direct sur le prix de l'EUA sur le marché européen du carbone. Nous observons aussi une dynamique d'interconnexion par l'intermédiaire du VAR(1) entre l'EUA et le CER.

La deuxième hypothèse est celle de l'hétérogénéité du comportement des agents. Nous étudions la relation de Co-mouvement entre le prix du quota (SCEQE) et celui du crédit carbone (MDP) par une analyse multi-échelle dérivée de la théorie des ondelettes. Nous montrons que quels que soient les différents horizons d'investissement retenus (court, moyen et long terme), il existe une relation positive significative entre les deux séries de prix. De plus la causalité dynamique par ondelettes sur chaque paire de bandes de fréquence, confirme notre hypothèse d'une relation instable entre l'EUA et le CER.

Le troisième chapitre complète le précédent par l'analyse du comouvement multi-échelle entre le prix du quota carbone issu du SCEQE et ceux des marchés énergétiques (pétrole, le Charbon et le Gaz). La cohérence par ondelettes et l'angle de cette étude peut être interprétée comme une mesure de

---

corrélation locale calculée de façon non-paramétrique. Cette première tentative de l'analyse multi-échelle de la relation de Co-mouvement entre le marché du CO<sub>2</sub>, du pétrole, du Gaz et du Charbon fondée sur l'hypothèse d'hétérogénéité des agents montre qu'il est possible aux intervenants sur le marché carbone d'avoir une grande palette de choix de stratégies leur permettant de mieux se prémunir contre les risques liés aux fortes volatilités du prix du carbone.

**Mots-clés** : Marché du carbone, Marchés de l'énergie (Brent, Charbon, Gaz), hétérogénéité des agents, Corrélation, Corrélation dynamique, Causalité de Granger, Ondelettes, Espace temps-fréquence, Coherence en ondelettes

## Résumé

The purpose of this thesis is to contribute to the understanding of the carbon price quota structure, the analysis of its fluctuation, and the interactions that may exist between on the one hand the EU system of emission quota exchange (ETS) and the mechanism for clean development (CDM) and on the other hand between carbon quota market and the quota in the energy sector.

For this study, we introduced the hypothesis of heterogeneity of agents' behavior on the carbon market where coexist multiple scales of investments.

To achieve this, we used a time-frequency approach (wavelets) that can analyze the local behavior of a signal by isolating the components related to the agents trading frequency. This method allows variance decomposition of a time series into different frequency components. The time investment horizons are assigned to each frequency band associated with a degree of market risk. High frequency bands obtained by wavelet decomposition contain information pertaining to the short-term time series structure; the medium and the low frequencies respectively capture the structures of the time series in the medium and long term.

To complete this project we proposed developing of our research in 3 chapters :

The first chapter presents the carbon market, its creation, its operation, and the various actors who animate it. The formation of the CO<sub>2</sub> price, its evolution and its determinants were also analyzed during this chapter.

The second chapter develops a multi-scale analysis of the co-movement between price of quota (ETS) and carbon credit (CDM). This particular study was based on two assumptions :

- The first assumption was the homogeneity of the various agents behaviors. The co-movement relationship between the price of quota (ETS)

---

and carbon credit (CDM) assumes that market participants have the same investment strategy especially since all stakeholders agents invest in these markets on the same horizons. This relationship is studied using standard econometric tools such as Analysis of Co-integration of causality and Vector Autoregressive modeling.

The main result of this specific part highlights the existence of a unidirectional causality from the ERC to the EUA with an observed acceleration of the mechanism for clean development (CDM). Manufacturers have a strong interest in the CDM which has had a direct impact on the price of EUAs on the European carbon market. We also observed a dynamic interconnection through the VAR (1) between EUA and CER.

- The second assumption is the heterogeneity of agents' behavior. We highlighted the relationship of co-movement between price of quota (ETS) and carbon credit (CDM) to a multi-scale analysis derived from wavelet theory.

We show that whatever the different investment horizons retained (short, medium and long term), there is a significant positive relationship between the two sets of prices. The more dynamic causal wavelet on each pair of frequency bands detects an unstable relationship between EUA and CER which confirms our working hypothesis.

And finally, a third chapter that complements the previous analysis by the co-movement between multi-scale carbon allowance prices resulting from the ETS to those energy markets (oil, coal and gas). Using coherence wavelet, it examined the simultaneous dependence (co-movement) between two price series in time and frequency. It can be interpreted as a local measurement of correlation calculated non-parametrically.

Overall, this study is the first attempt at a multi-scale analysis of the co-movement relationship between the CO<sub>2</sub> market, Oil, Gas and Coal which is based on the hypothesis of heterogeneity of agents using a template from wavelet algorithm.

---

The model used in this study will allow stakeholders agents on the carbon market to have a great range of choices for their strategies to be able to anticipate wisely because of the high volatility of carbon prices on their different investment horizons.

**keywords** :Carbon market, energy market (oil,coal,gas), heterogeneity of agents, correlation, dynamic correlation, Granger Causality, Wavelets, time-frequency space, Coherence wavelet.

---

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le réchauffement climatique observé depuis plusieurs années est, à priori, lié aux émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine humaine. Les premières inquiétudes sur ce phénomène remontent aux années 70.

En 1979 a eu lieu, à Genève, la première conférence mondiale sur le climat à l'initiative de deux organismes mondiaux : le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) et l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Leurs rôles qui étaient d'observer le phénomène de réchauffement climatique, ont conduit à la réalisation d'autres conférences, dont la plus importante est la commission Bruntland<sup>1</sup> de 1987, à l'origine du concept de développement durable.

En 1988, à la conférence de Toronto, a été signé une recommandation portant sur une réduction de 20% des GES par rapport au niveau de 1988 à l'horizon 2005. Au cours de celle-ci, le PNUE et l'OMM ont également procédé à la mise en place du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC).

Après la reconnaissance mondiale du phénomène de réchauffement climatique, la conférence de Rio de 1992 a permis de signer une convention cadre sur ce rechauffement. Elle est entrée en vigueur en 1994 et a pour objectif

---

1. officiellement intitulé, Notre avenir à tous (Our Common Future). Il s'agit d'une publication rédigée en 1987 par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations unies, présidée par la Norvégienne Gro Harlem Brundtland

---

de veiller à la stabilisation et à la réduction du stock des GES dans l'atmosphère. Cette convention a conduit à la mise en place de trois instruments issus du protocole de kyoto de 1997 :

- un marché basé sur le mécanisme de permis (marché international de quotas carbone) qui octroie des Unités de Quantités Attribuées (UQA) aux Etats de l'annexe-B (pays industrialisés). Ces unités doivent être égales à leurs différents objectifs d'émissions des GES sur la période de 2008 à 2012. Les pays doivent déclarer leurs émissions réelles et ne doivent pas dépasser les permis détenus. Lorsqu'un pays arrive à réduire ou à dépasser ses émissions par rapport à sa capacité réelle, ce dernier peut vendre ou acheter son excédent aux autres pays de l'annexe-B.
- un marché constitué de deux sous mécanismes de flexibilité de financement de projets. La Mise en Oeuvre Conjointe (MOC) et le Mécanisme pour un Développement Propre (MDP). Ces deux instruments permettent aux pays de réduire une partie de leurs émissions en dehors de leur territoire national :
  1. Le MOC est l'instrument qui met en relation deux pays industrialisés. Il consiste à financer des projets dans un pays de l'annexe B, les crédits issus de ces projets sont appelés Unités de Réduction d'Emision (URE, il s'agit du crédit carbone obtenu par le système de Mise en Oeuvre Conjointe (MOC)). Ce mécanisme ne crée pas de nouveaux crédits mais permet le transfert des unités de réduction d'un pays industrialisé vers un autre pays industrialisé dit pays de l'annexe-B. Lorsqu'une quantité de crédits est transférée d'un pays à un autre, ces derniers s'ajoutent aux quotas du pays investisseur et, une quantité de quota équivalente est annulée dans le pays où le projet a été réalisé.

---

2. Le MDP est l'instrument qui permet le financement des projets par un pays industrialisé dans un pays non-annexe-B (pays en développement). Les crédits issus de ces projets sont appelés unités de réduction certifiées des émissions (URCE) ou Certified Emission Reduction (CER) en anglais. Lorsque des CER sont créés, il n'y a pas, contrairement aux URE, de destruction d'UQA en contrepartie, puisque le pays qui reçoit ces CER n'est pas membre de l'annexe-B. Les projets MDP ont donc pour objectif d'encourager le transfert de technologies faiblement émettrices.

Le MDP est considéré par de nombreux pays industrialisés comme un moyen plus rentable pour répondre au changement climatique. Dans le but de s'assurer, que l'apport de ce mécanisme entraîne une réduction plus importante des émissions des GES, et pour empêcher les pays industrialisés une utilisation excessive des crédits issus de projets, deux critères ont été prévus par le protocole de Kyoto (CCNUCC, 2002)<sup>2</sup>; les critères d'additionnalité et de complémentarité (ou principe de supplémentarité). Ils imposent aux pays industrialisés la mise en place et l'application des programmes au niveau national pour lutter contre le changement climatique afin de s'acquitter de leurs engagements de réduction des GES. Ce n'est qu'en guise de « complément » (principe de complémentarité / de supplémentarité) que le protocole de Kyoto a imaginé l'intervention de ces mécanismes, dits de flexibilité.

Pour atteindre ses objectifs, sur la période 2008-2012, l'Union Européenne a créé un système européen d'échange de quotas de  $CO_2$  (ETS), dont la finalité est de réduire de 8% les émissions de sa zone. Notons cependant que le fonctionnement du marché européen est identique à celui du marché international des quotas de carbone.

---

2. Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques

---

Les entreprises Européennes qui perçoivent des permis d'émissions ou des quotas carbone (EUA) au début de chaque année, ont deux possibilités : soit elles investissent dans de nouvelles technologies de dépollution pour respecter les quotas imposés, soit elles considèrent qu'il est préférable de polluer au dessus du quota imposé. Elles se présentent alors sur le marché pour acheter le droit d'émettre des tonnes supplémentaires de carbone. Pour remplir leurs objectifs, ces entreprises ont le choix d'intervenir sur le marché du carbone européen, d'investir dans des projets de réduction des émissions ou d'utiliser les deux outils.

L'évolution à la hausse du prix du carbone depuis ces dernières années, incite les intervenants à investir dans des technologies énergétiques alternatives lesquelles réalisent une transition progressive d'une industrie polluante vers une plus propre et plus durable.

En 2008, le rapport de la banque mondiale stipule que 540 Mega-tonnes (Mt) de  $CO_2$  ont été utilisé par les Etats membres de l'Union Européenne pour combler une partie de leur écart d'émission. Ils ont procédé pour cela à l'établissement d'un lien entre le MDP et le SCEQE<sup>3</sup> afin d'accroître leur rentabilité et d'atteindre leurs objectifs de réduction des GES à un coût minimale (UE, 2004).

De nombreuses études fournissent une vision complète de l'organisation et du fonctionnement du marché carbone. Cependant, ces travaux de nature plutôt théorique reposent sur plusieurs hypothèses (Critères de complémentarité et d'additionnalité) et concluent à des résultats divers (Fatemeh(2010)) : le coût marginal de réduction des GES dans les pays en développement est plus faible que dans les pays industrialisés; les prix des crédits carbonés (CER) générés dans le cadre du MDP devraient être inférieurs aux prix des quotas carbone du SCEQE, en considérant qu'ils ont une valeur égale en

---

3. Système communautaire d'échange de quota d'émission

---

termes d'émissions du carbone. Anger et al (2007) ont montré qu'en reliant le SCEQE et le MDP, le prix du quota carbone était réduit à 25\$US pour un scénario dans lequel la question de l'additionnalité était prise en compte, alors que l'utilisation de l'air chaud<sup>4</sup> n'était pas autorisée. Criqui et Kitous (2003) ont montré que, les coûts de mise en conformité étaient réduits de 60% dans les différents secteurs de ETS<sup>5</sup>. Selon Klepper et Peterson (2006), la mise en relation entre le SCEQE et le MDP dans le cas de la disponibilité de l'air chaud, conduit le prix du quota carbone à tendre vers zéro.

Des analyses économétriques ont également été réalisées. Elles concernent par exemple la volatilité du prix du quota carbone ( Chevallier et al. 2009a, 2009b, 2010, 2012 ), les déterminants de ce prix (Alberola et al. 2009), la modélisation nonparamétrique du prix du carbone (Chevallier, 2011), l'analyse de la cointégration, l'utilisation des modèles vecteur autoregressif, l'emploi de tests de réponse impulsionnelle entre le EUA et le CER (chevallier 2010, et Nazifi, 2010), la modélisation du spread entre le EUA et le CER ( Maria-mansanet et al. 2010, et Nazifi, 2013) . . .

Ils font l'hypothèse que tous les intervenants sur le marché carbone ont un comportement homogène. Autrement dit, les différentes méthodes économétriques utilisées possèdent une même résolution pour tous les horizons temporels. Ces études, réalisées sur les données historiques des prix issues du SCEQE du MDP, considèrent une homogénéité de l'information quel que soit l'horizon temporel des agents intervenants sur ces marchés c'est à dire leurs fréquences de trading ( intra-days, journalières, hebdomadaire, mensuelle, annuelle . . .).

---

4. Les droits d'émissions excédentaires des économies en transition avec des objectifs qui sont en dessous de leurs (business-as-usual (BAU)) niveaux, résultent de l'effondrement économique. Ils sont appelés «air chaud».

5. Emission Trading Scheme

---

Or le marché carbone européen dans son fonctionnement rassemble plusieurs acteurs, dont les principaux sont les émetteurs de GES, les courtiers (court terme), les investisseurs (les grandes sociétés ou des institutions financières : moyen terme) et enfin la commission européenne (long terme) qui est le régulateur. Ces acteurs du marché ont des comportements différents, selon leurs croyances, leurs attentes, ou encore leurs profils de risque. Ces différences de sensibilités peuvent être rattachées aux différents horizons temporels qui les concernent. Cette distinction comportementale, est similaire à celle observée sur les marchés financiers par De Long et al. (1990a) et (1990b) qui retiennent une première catégorie d'intervenants constituée par les fundamentalistes, agents bien informés, plus rationnels et averses au risque. La base de leur pouvoir de négociation sur la valeur fondamentale des prix des actifs est déterminée par le modèle d'actualisation des dividendes. Une seconde catégorie est composée selon ces auteurs par les noise traders ou les chartistes qui sont moins informés, irrationnels, et moins averses au risque. Leur règle de trading est basée sur l'analyse des différentes techniques qui consiste à extrapoler une tendance sur les prix des actifs.

La performance relative de ces deux catégories d'intervenants laisse apparaître au cours du temps une très grande disparité. L'horizon temporel est donc le principe de base qui entraîne une disparité comportementale des acteurs intervenants sur les marchés financiers. Cette hypothèse de travail n'a pas été prise en compte par les études qui ont été réalisés jusqu'à ce jour sur le marché carbone.

Nous souhaitons, dans cette thèse contribuer à cette compréhension de la structure du prix du quota carbone, à l'analyse de sa fluctuation, et aux interactions pouvant exister entre d'une part le système communautaire d'échange de quota d'émission (SCEQE) et le mécanisme pour le développement propre (MDP) et d'autre part entre le marché du quota carbone et

---

ceux du secteur de l'énergie. Pour cela nous faisons intervenir l'hypothèse d'hétérogénéité des comportements des agents sur le marché carbone où co-existent de multiples échelles d'investissements.

Pour réaliser cet objectif, nous faisons appel à une approche temps-fréquence (ondelettes) qui permet d'analyser le comportement local d'un signal, en isolant les composantes relatives aux fréquences de trading des agents. Cette méthode permet la décomposition de la variance d'une série chronologique en différentes composantes fréquentielles. Les horizons temporels de placement sont affectés à chaque bande de fréquences liés à un degré de risque du marché. Les bandes à haute fréquence obtiennent par la décomposition en ondelettes renferment l'information relative à la structure de la série chronologique à court terme ; celle à moyenne et à basse fréquence captent respectivement les structures de la série chronologique à moyen et long terme.

Pour concrétiser notre apport nous proposons un développement de notre recherche en 3 chapitres.

- Le premier, est une présentation du marché carbone. Plus spécifiquement, nous présentons sa création, son fonctionnement, et les différents acteurs qui l'animent. Nous analysons par la suite la formation du prix du  $CO_2$ , son évolution et ses facteurs déterminants.

- Le deuxième chapitre est une analyse multi-échelle du co-mouvement entre le prix du quota (SCEQE) et du crédit carbone (MDP). L'étude s'effectue selon deux hypothèses :

- La première est l'homogénéité du comportement des agents. La relation de co-mouvement entre le prix du quota (SCEQE) et du crédit carbone (MDP) suppose que les intervenants sur le marché disposent d'une

---

même stratégie d'investissement. De plus, l'on considère que tous les agents intervenants sur ces marchés investissent sur le même horizons. Cette relation est étudiée à l'aide des outils d'économétrie standard (Analyse de la Cointégration, de la causalité, modélisation vecteur Autorégressif).

- La deuxième hypothèse est celle de l'hétérogénéité du comportement des agents. Nous faisons appel dans ce cas pour étudier la relation du Co-mouvement entre le prix du quota (SCEQE) et du crédit carbone (MDP) une analyse multi-échelle dérivée de la théorie des ondelettes.

- Le troisième chapitre complète le précédent par l'analyse du co-mouvement multi-échelle entre le prix du quota carbone issu du SCEQE à ceux des marchés énergétiques (pétrole, le Charbon et le Gaz). En utilisant la cohérence par ondelettes. Elle permet d'étudier la dépendance simultanée (co-mouvement) entre deux séries de prix dans le domaine du temps et celui des fréquences. Elle peut être interprétée comme une mesure de corrélation locale calculée de façon non-paramétrique.

Dans le cadre de la politique Cap and trade ( politique du plafonnement et des échanges commerciales ) du marché carbone (dont l'objectif est de fixer à l'avance la quantité des GES qui sera transférée pour une période d'exercice bien déterminée), les permis de pollution sont échangés entre les unités de surplus et de déficit. Les contrats futures du marché carbone permettent aux différents intervenants de ce marché de se couvrir face aux risques du marché au comptant du carbone. Il est donc très important de prendre en compte l'existence de la relation entre le marché du carbone et ceux du secteur de l'énergie qui participent largement aux émissions de GES.

# Remerciement

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements au Professeur Michel TERRAZA, mon directeur de thèse, pour la confiance qu'il a bien voulu m'accorder en acceptant de diriger cette thèse. Outre les conseils judicieux et le soutien qu'il m'a apporté, les analyses critiques et la rigueur scientifique ont largement contribué à éclairer ce travail.

Ma reconnaissance va également au Professeur Jules SADEFO KAMDEM, mon co-directeur de thèse, pour tous les conseils qu'il m'a prodigués, son pragmatisme, son soutien moral et sa rigueur scientifique.

A Madame Anne PEGUIN FEISSOLLE, et à Monsieur Zied FTITI, je souhaite également exprimer mes plus sincères remerciements pour avoir accepté de rédiger les rapports de cette thèse.

Je remercie également Madame Maria MANSANET-BATALLER qui a bien voulu faire partie du jury.

Je remercie tous ceux qui de près ou de loin m'ont apporté leur soutien et leurs encouragements, notamment mes amis du LAMETA Sadek MELHEM, Abdoul salam DIALLO, Francois Behnmad et alfred Mbairadjim avec qui les discussions étaient très bénéfiques.

---

Je tiens à remercier Irène Blondeau pour sa disponibilité et sa patience, également Isabelle Romestan, Thesy Pothet, Thierry Blayac, Françoise Seyte, Stéphane Mussard et Beaud Michael pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée.

Ma profonde gratitude s'adresse en tout premier lieu à mon père et ma mère pour m'avoir encouragé et pour les valeurs qu'ils m'ont transmises sans lesquelles ce travail n'aurait pas été possible. Merci également aux membres de ma famille, Duquenne, Hydeale, Junior pour leur soutien et leurs encouragements.

Sans oublier ma petite famille, ma femme, Rahila Iro Arzika et mon fils, Nsouadi Arzika Elikia; qui m'ont soutenu et donné beaucoup de force dans mes recherches.

## Sommaire

<b>Introduction</b> .....	6
<b>CHAPITRE I</b> : Présentation du marché carbone.....	15
Section 1 : Le Changement climatique : Réalités et Conséquences.....	18
Section 2 : Le fonctionnement du marché Européen de permis d'émission.....	43
Conclusion :.....	55
<b>CHAPITRE II</b> : Analyse multi-échelle du Co-mouvement entre le prix du quota (SCEQE) et du crédit carbone (MDP) .....	57
Section1 : La méthodologie.....	59
Section 2 : Analyse bivariée de la relation entre le prix du quota et du crédit Carbone.....	73
Section 3 : Analyse Multi-échelle entre le prix du quota et du crédit carbone.....	86
Conclusion :.....	102
<b>CHAPITRE III</b> : Analyse temps-fréquence du co-mouvement entre le marché européen du CO2 et les autres marchés de l'énergie.....	105
Section 1 : Une présentation des différents marchés énergétiques retenues dans l'analyse.....	108
Section 2 : L'étude économétrique multi-échelle .....	138
Conclusion.....	148
<b>Conclusion générale et perspectives</b> .....	152
Bibliographie.....	156
A Annexe.....	173

# Introduction générale

Le réchauffement climatique observé depuis plusieurs années est, à priori, lié aux émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine humaine. Les premières inquiétudes sur ce phénomène remontent aux années 70.

En 1979 a eu lieu, à Genève, la première conférence mondiale sur le climat à l'initiative de deux organismes mondiaux: le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) et l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Leurs rôles qui étaient d'observer le phénomène de réchauffement climatique, ont conduit à la réalisation d'autres conférences, dont la plus importante est la commission Bruntland (officiellement intitulé, Notre avenir à tous (Our Common Future)).

Il s'agit d'une publication rédigée en 1987 par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations unies, présidée par la Norvégienne Gro Harlem Brundtland) de 1987, à l'origine du concept de développement durable.

En 1988, à la conférence de Toronto, a été signé une recommandation portant sur une réduction de 20% des GES par rapport au niveau de 1988 à l'horizon 2005. Au cours de celle-ci, le PNUE et l'OMM ont également procédé à la mise en place du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC).

Après la reconnaissance mondiale du phénomène de réchauffement climatique, la conférence de Rio de 1992 a permis de signer une convention cadre

---

sur ce rechauffement. Elle est entrée en vigueur en 1994 et a pour objectif de veiller à la stabilisation et à la réduction du stock des GES dans l'atmosphère. Cette convention a conduit à la mise en place de trois instruments issus du protocole de kyoto de 1997 :

- un marché basé sur le mécanisme de permis (marché international de quotas carbone) qui octroi des Unités de Quantités Attribuées (UQA) aux Etats de l'annexe-B (pays industrialisés). Ces unités doivent être égales à leurs différents objectifs d'émissions des GES sur la période de 2008 à 2012. Les pays doivent déclarer leurs émissions réelles et ne doivent pas dépasser les permis détenus. Lorsqu'un pays arrive à réduire ou à dépasser ses émissions par rapport à sa capacité réelle, ce dernier peut vendre ou acheter son excédent aux autres pays de l'annexe-B.
  
- un marché constitué de deux sous mécanismes de flexibilité de financement de projets. La Mise en Oeuvre Conjointe (MOC) et le Mécanisme pour un Développement Propre (MDP). Ces deux instruments permettent aux pays de réduire une partie de leurs émissions en dehors de leur territoire national:
  1. Le MOC est l'instrument qui met en relation deux pays industrialisés. Il consiste à financer des projets dans un pays de l'annexe B, les crédits issus de ces projets sont appelés Unités de Réduction d'Émission (URE, il s'agit du crédit carbone obtenu par le système de Mise en Oeuvre Conjointe (MOC)). Ce mécanisme ne crée pas de nouveaux crédits mais permet le transfert des unités de réduction d'un pays industrialisé vers un autre pays industrialisé dit pays de l'annexe-B. Lorsqu'une quantité de crédits est transférée d'un pays à un autre, ces derniers s'ajoutent aux quotas du pays

---

investisseur et, une quantité de quota équivalente est annulée dans le pays où le projet a été réalisé.

2. Le MDP est l'instrument qui permet le financement des projets par un pays industrialisé dans un pays non-annexe-B (pays en développement). Les crédits issus de ces projets sont appelés unités de réduction certifiées des émissions (URCE) ou Certified Emission Reduction (CER) en anglais. Lorsque des CER sont créés, il n'y a pas, contrairement aux URE, de destruction d'UQA en contrepartie, puisque le pays qui reçoit ces CER n'est pas membre de l'annexe-B. Les projets MDP ont donc pour objectif d'encourager le transfert de technologies faiblement émettrices.

Le MDP est considéré par de nombreux pays industrialisés comme un moyen plus rentable pour répondre au changement climatique. Dans le but de s'assurer, que l'apport de ce mécanisme entraîne une réduction plus importante des émissions des GES, et pour empêcher les pays industrialisés une utilisation excessive des crédits issus de projets, deux critères ont été prévus par le protocole de Kyoto (CCNUCC, 2002)<sup>1</sup>; les critères d'additionnalité et de complémentarité (ou principe de complémentarité). Ils imposent aux pays industrialisés la mise en place et l'application des programmes au niveau national pour lutter contre le changement climatique afin de s'acquitter de leurs engagements de réduction des GES. Ce n'est qu'en guise de « complément » (principe de complémentarité / de complémentarité) que le protocole de Kyoto a imaginé l'intervention de ces mécanismes, dits de flexibilité.

---

<sup>1</sup>Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques

---

Pour atteindre ses objectifs, sur la période 2008-2012, l'Union Européenne a créé un système européen d'échange de quotas de  $CO_2$  (ETS), dont la finalité est de réduire de 8% les émissions de sa zone. Notons cependant que le fonctionnement du marché européen est identique à celui du marché international des quotas de carbone.

Les entreprises Européennes qui perçoivent des permis d'émissions ou des quotas carbone (EUA) au début de chaque année, ont deux possibilités: soit elles investissent dans de nouvelles technologies de dépollution pour respecter les quotas imposés, soit elles considèrent qu'il est préférable de polluer au dessus du quota imposé. Elles se présentent alors sur le marché pour acheter le droit d'émettre des tonnes supplémentaires de carbone. Pour remplir leurs objectifs, ces entreprises ont le choix d'intervenir sur le marché du carbone européen, d'investir dans des projets de réduction des émissions ou d'utiliser les deux outils.

L'évolution à la hausse du prix du carbone depuis ces dernières années, incite les intervenants à investir dans des technologies énergétiques alternatives lesquelles réalisent une transition progressive d'une industrie polluante vers une plus propre et plus durable.

En 2008, le rapport de la banque mondiale stipule que 540 Mega-tonnes (Mt) de  $CO_2$  ont été utilisé par les Etats membres de l'Union Européenne pour combler une partie de leur écart d'émission. Ils ont procédé pour cela à l'établissement d'un lien entre le MDP et le SCEQE<sup>2</sup> afin d'accroître leur rentabilité et d'atteindre leurs objectifs de réduction des GES à un coût minime (UE, 2004).

De nombreuses études fournissent une vision complète de l'organisation et du fonctionnement du marché carbone. Cependant, ces travaux de nature plutôt théorique reposent sur plusieurs hypothèses (Critères de com-

---

<sup>2</sup>Système communautaire d'échange de quota d'émission

---

plémentarité et d'additionnalité) et concluent à des résultats divers (Fate-meh(2010)): le coût marginal de réduction des GES dans les pays en developpement est plus faible que dans les pays industrialisés; les prix des crédits carbonés (CER) générés dans le cadre du MDP devraient être inférieurs aux prix des quotas carbone du SCEQE, en considérant qu'ils ont une valeur égale en termes d'émissions du carbone. Anger et al (2007) ont montré qu'en reliant le SCEQE et le MDP, le prix du quota carbone était réduit à 25\$US pour un scénario dans lequel la question de l'additionnalité était prise en compte, alors que l'utilisation de l'air chaud<sup>3</sup> n'était pas autorisée. Criqui et Kitous (2003) ont montré que, les coûts de mise en conformité étaient réduit de 60% dans les différents secteurs de ETS<sup>4</sup>. Selon Klepper et Peterson (2006), la mise en relation entre le SCEQE et le MDP dans le cas de la disponibilité de l'air chaud, conduit le prix du quota carbone à tendre vers zéro.

Des analyses économétriques ont également été réalisées. Elles concernent par exemple la volatilité du prix du quota carbone ( Chevallier et al. 2009a, 2009b, 2010, 2012 ), les déterminants de ce prix (Alberola et al. 2009), la modélisation nonparamétrique du prix du carbone (Chevallier, 2011), l'analyse de la cointégration, l'utilisation des modèles vecteur autoregressif, l'emploi de tests de réponse impulsionnelle entre le EUA et le CER (chevalier 2010, et Nazifi, 2010), la modélisation du spread entre le EUA et le CER ( Maria-mansanet et al. 2010, et Nazifi, 2013) . . . .

Ils font l'hypothèse que tous les intervenants sur le marché carbone ont un comportement homogène. Autrement dit, les différentes méthodes économétriques utilisées possèdent une même résolution pour tous les horizons temporels.

---

<sup>3</sup>Les droits d'émissions excédentaires des économies en transition avec des objectifs qui sont en dessous de leurs (business-as-usual (BAU)) niveaux, résultent de l'effondrement économique.Ils sont appelés «air chaud».

<sup>4</sup>Emission Trading Scheme

---

Ces études, réalisées sur les données historiques des prix issues du SCEQE du MDP, considèrent une homogénéité de l'information quel que soit l'horizon temporel des agents intervenants sur ces marchés c'est à dire leurs fréquences de trading ( intra-days, journalières, hebdomadaire, mensuelle, annuelle . . . ).

Or le marché carbone européen dans son fonctionnement rassemble plusieurs acteurs, dont les principaux sont les émetteurs de GES, les courtiers (court terme), les investisseurs (les grandes sociétés ou des institutions financières: moyen terme) et enfin la commission européenne (long terme) qui est le régulateur. Ces acteurs du marché ont des comportements différents, selon leurs croyances, leurs attentes, ou encore leurs profils de risque. Ces différences de sensibilités peuvent être rattachées aux différents horizons temporels qui les concernent. Cette distinction comportementale, est similaire à celle observée sur les marchés financiers par De Long et al. (1990a) et (1990b) qui retiennent une première catégorie d'intervenants constituée par les fondamentalistes, agents bien informés, plus rationnels et averses au risque. La base de leur pouvoir de négociation sur la valeur fondamentale des prix des actifs est déterminée par le modèle d'actualisation des dividendes. Une seconde catégorie est composée selon ces auteurs par les noise traders ou les chartistes qui sont moins informés, irrationnels, et moins averses au risque. Leur règle de trading est basée sur l'analyse des différentes techniques qui consiste à extrapoler une tendance sur les prix des actifs.

La performance relative de ces deux catégories d'intervenants laisse apparaître au cours du temps une très grande disparité. L'horizon temporel est donc le principe de base qui entraîne une disparité comportementale des acteurs intervenants sur les marchés financiers. Cette hypothèse de travail n'a pas été prise en compte par les études qui ont été réalisés jusqu'à ce jour sur le marché carbone.

---

Nous souhaitons, dans cette thèse contribuer à cette compréhension de la structure du prix du quota carbone, à l'analyse de sa fluctuation, et aux interactions pouvant exister entre d'une part le système communautaire d'échange de quota d'émission (SCEQE) et le mécanisme pour le développement propre (MDP) et d'autre part entre le marché du quota carbone et ceux du secteur de l'énergie. Pour cela nous faisons intervenir l'hypothèse d'hétérogénéité des comportements des agents sur le marché carbone où co-existent de multiples échelles d'investissements.

Pour réaliser cet objectif, nous faisons appel à une approche temps-fréquence (ondelettes) qui permet d'analyser le comportement local d'un signal, en isolant les composantes relatives aux fréquences de trading des agents. Cette méthode permet la décomposition de la variance d'une série chronologique en différentes composantes fréquentielles. Les horizons temporels de placement sont affectés à chaque bande de fréquences liés à un degré de risque du marché. Les bandes à haute fréquence obtiennent par la décomposition en ondelettes renferment l'information relative à la structure de la série chronologique à court terme; celle à moyenne et à basse fréquence captent respectivement les structures de la série chronologique à moyen et long terme.

Pour concrétiser notre apport nous proposons un développement de notre recherche en 3 chapitres.

- Le premier, est une présentation du marché carbone. Plus spécifiquement, nous présentons sa création, son fonctionnement, et les différents acteurs qui l'animent. Nous analysons par la suite la formation du prix du  $CO_2$ , son évolution et ses facteurs déterminants.

---

• Le deuxième chapitre est une analyse multi-échelle du co-mouvement entre le prix du quota (SCEQE) et du crédit carbone (MDP). L'étude s'effectue selon deux hypothèses:

- La première est l'homogénéité du comportement des agents. La relation de co-mouvement entre le prix du quota (SCEQE) et du crédit carbone (MDP) suppose que les intervenants sur le marché disposent d'une même stratégie d'investissement. De plus, l'on considère que tous les agents intervenants sur ces marchés investissent sur le même horizons. Cette relation est étudiée à l'aide des outils d'économétrie standard (Analyse de la Cointégration, de la causalité, modélisation vecteur Autorégressif).
- La deuxième hypothèse est celle de l'hétérogénéité du comportement des agents. Nous faisons appel dans ce cas pour étudier la relation du Co-mouvement entre le prix du quota (SCEQE) et du crédit carbone (MDP) une analyse multi-échelle dérivée de la théorie des ondelettes.

• Le troisième chapitre complète le précédent par l'analyse du co-mouvement multi-échelle entre le prix du quota carbone issu du SCEQE à ceux des marchés énergétiques (pétrole, le Charbon et le Gaz). En utilisant la cohérence par ondelettes. Elle permet d'étudier la dépendance simultanée (co-mouvement) entre deux séries de prix dans le domaine du temps et celui des fréquences. Elle peut être interprétée comme une mesure de corrélation locale calculée de façon non-paramétrique.

Dans le cadre de la politique Cap and trade ( politique du plafonnement et des échanges commerciales ) du marché carbone (dont l'objectif est de fixer à l'avance la quantité des GES qui sera transférée pour une période d'exercice

---

bien déterminée), les permis de pollution sont échangés entre les unités de surplus et de déficit. Les contrats futures du marché carbone permettent aux différents intervenants de ce marché de se couvrir face aux risques du marché au comptant du carbone. Il est donc très important de prendre en compte l'existence de la relation entre le marché du carbone et ceux du secteur de l'énergie qui participent largement aux émissions de GES.

Cette étude est la première tentative d'analyse multi-échelle de la relation de Co-mouvement entre le marché du  $CO_2$ , du pétrole, du Gaz et du Charbon qui se fonde sur l'hypothèse d'hétérogénéité des agents en utilisant le modèle issu de la transformée en ondelettes. Le modèle utilisé dans cette étude va permettre aux agents intervenants sur le marché carbone d'avoir une grande palette de choix de stratégies leurs permettant de bien se couvrir en raison des fortes volatilités du prix du carbone sur leurs différents horizons d'investissement.

# Chapter 1

## Présentation du marché carbone

Le réchauffement de la planète caractérisé par la montée spectaculaire de la température terrestre suivie d'une fonte des glaces, des sécheresses dans certaines régions, fortes inondations dans d'autres, multiplication des événements météorologiques extrêmes, est depuis une dizaine d'année au centre des préoccupations de tous les débats écologiques, politiques, économiques, financiers et sociologiques. Sa présence dans l'actualité montre une prise de conscience planétaire. En effet, les scientifiques enregistrent depuis un certain temps une accélération croissante des températures de l'atmosphère et des océans, une fonte généralisée des glaciers et de la neige dans les zones polaires qui a entraînée au 20<sup>ième</sup> siècle une augmentation spectaculaire de 17cm en moyenne du niveau des mers.

Les températures de la surface de la terre sont enregistrées depuis 1850. Les chercheurs ont observé une augmentation moyenne de 0,74°C entre 1906 et 2005. Il y a cependant des valeurs inhabituelles qui sont observées depuis les 50 dernières années au regard des 1300 dernières années au moins. Il est envisageable que la hausse de la température moyenne mondiale constatée ces 50 dernières années soit due aux émissions de gaz à effet de serre issues

de l'activité humaine. Ce constat est confirmé par le rapport<sup>1</sup> publié en 2010 par la Banque Mondiale (BM). Il propose des prévisions scientifiques liées à l'augmentation des GES dans l'atmosphère.

À l'instar des stratégies portant sur la baisse des GES, ce rapport présente un scénario qui porte le nom de "baseline" ou "business as usual" qui stipule une augmentation de 5% de la température terrestre à l'horizon 2100 avec une accumulation des GES qui pourra aller au delà de 800 ppm<sup>2</sup>. La présence dans l'atmosphère d'une quantité énorme de  $CO_2$  provenant principalement de l'utilisation massive des fossiles comme carburant a permis son passage de 28.7 *GteqCO<sub>2</sub>/année*<sup>3</sup> en 1970 pour atteindre 49 *GteqCO<sub>2</sub>/année* à la fin de l'année 1984. L'élévation de la température terrestre aura des conséquences catastrophiques sur le système écologique, et cela entrainera de grandes répercussions économiques, sociales, et humaines.

Une réduction de nos émissions des GES de manière drastique est donc nécessaire pour limiter le changement climatique et ses implications. La place qu'occupe ce débat pour l'humanité conduit à la mise en place d'une analyse plus approfondie de ce phénomène. Cette dernière fait recourt aux compétences de plusieurs domaines de la science à savoir:

- Des climatologues qui doivent mesurer l'impact du réchauffement sur l'environnement tout en précisant la responsabilité des humains.
- les économistes ont aussi un grand travail à faire pour analyser les conséquences du réchauffement climatique sur les activités productives

---

<sup>1</sup>Rapport sur le développement dans le monde 2010 "RDM 2010" : Développement et changement climatique

<sup>2</sup>La concentration des GES est mesurée en particules par million (ppm), elle oscillait entre 200 et 300 ppm depuis 800000 ans et a augmenté au cours de ces 150 dernières années, pour dépasser 387 ppm en 2007

<sup>3</sup> gigatonnes équivalent carbone par année

et la mise en place des instruments efficaces pour lutter contre l'émission des GES.

La mise en place des outils économiques et financiers nouveaux est nécessaire pour lutter contre l'émission des GES et permettre la coordination des efforts des différents pays du globe. Les émissions des GES recouvrent toute la surface de la terre, tous les pays du globe sont touchés par ce phénomène, ce qui rend ce problème très inquiétant car quel que soit leur lieu d'émission, le réchauffement se repand partout sur la surface de la terre.

Suite à ce phénomène climatique, en 1979 à Genève, s'est tenu la première conférence mondiale sur le climat à l'initiative de deux organismes mondiaux: le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) et l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Leurs rôles étaient d'observer le phénomène de réchauffement climatique. Cette dernière conférence a conduit par la suite à la réalisation d'autres conférences, dont la plus importante est la commission Bruntland<sup>4</sup> de 1987, à l'origine du concept de développement durable<sup>5</sup>. La réduction de 20% proposé en 1988 lors de la conférence de Toronto des GES par rapport au niveau de 1988 à l'horizon 2005, a entraîné la création du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

Après la reconnaissance mondiale du phénomène de réchauffement climatique, quatre rapports (de 1990, 1995, 2001, et de 2007) d'études réalisés par le GIEC ont été publiés. Le rapport de 1990 faisait état d'hypothèse d'un réchauffement, celui de 1995 portait sur la possibilité d'une participation des

---

<sup>4</sup>officiellement intitulé, Notre avenir à tous (Our Common Future), est une publication rédigée en 1987 par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations unies, présidée par la Norvégienne Gro Harlem Brundtland

<sup>5</sup>Un développement qui réponde aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs

activités humaines au phénomène climatique. C'est le rapport publié en 2007 par le GIEC qui a pû convaincre l'opinion internationale. Ce rapport stipule que les recherches scientifiques et l'observation des phénomènes naturels confirment le phénomène de réchauffement climatique. L'accent est mis sur l'observation par satellite des fontes des glaciers et l'augmentation du niveau des mers.

Le GIEC confirme une contribution humaine au phénomène du réchauffement de la terre suite à l'observation par les scientifiques d'une augmentation de 1<sup>0</sup>C depuis la grande période industrielle.

La planète est un bien commun à tous les peuples de la terre, seule une action collective mais bien orientée peut stabiliser les concentrations en  $CO_2$  autour de 500 ppm, ce qui entrainera une baisse de la température de la terre aux environs de 2<sup>0</sup>C d'ici 2050. La question qu'il faut se poser est de savoir, comment se sont organisés les différents pays du globe pour la mise en place d'une coordination internationale afin de lutter contre le réchauffement de la planète.

## **1.1 Le changement climatique: Réalités et Conséquences**

### **1.1.1 Le climat et ses perturbations**

#### **1.1.1.1 Le principe de l'effet de serre**

Depuis sa découverte en 1896 par le chimiste d'origine suédoise Svante Arrhenius, l'effet de serre et le régime climatique qui en résulte sont à la base de la vie sur terre, en stabilisant sur presque toute la surface du globe des

températures permettant de maintenir la vie (fig??).

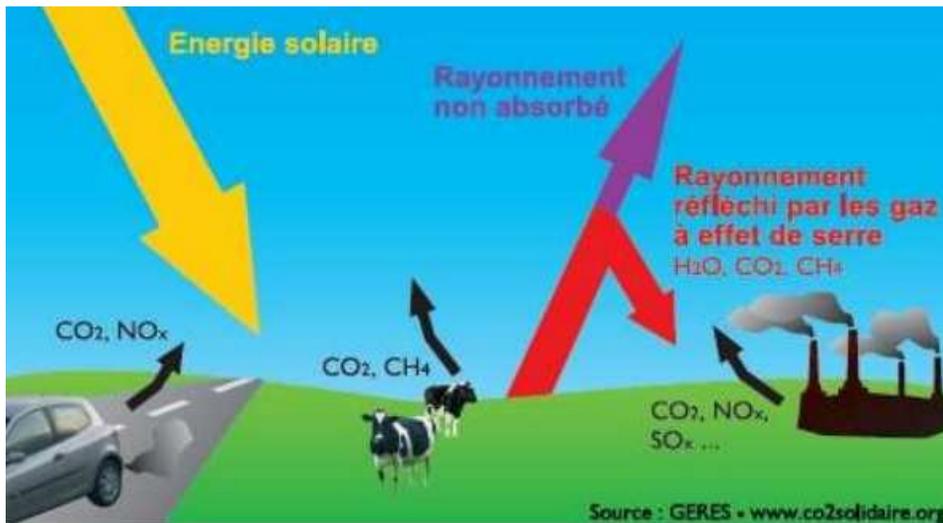


Figure 1.1: Le principe de l'effet de serre.

La capacité qu'a l'atmosphère de filtrer naturellement les rayons du soleil qui sont renvoyés sous forme d'infrarouge après avoir été absorbé par le sol terrestre, permet de protéger la terre d'un rayonnement trop fort tout en captant une partie de la chaleur renvoyée vers l'espace par un ensemble des gaz<sup>6</sup>, permettant ainsi de maintenir le niveau de la température terrestre à une moyenne de 15°C. C'est ce phénomène d'effet de serre qui permet de maintenir une température moyenne sur la terre permettant la vie.

Cependant, certains gaz atmosphériques aux premiers rang desquels on trouve la vapeur d'eau ( $H_2O$ ), le dioxyde de carbone ( $O_2$ ), le méthane ( $CH_4$ ), l'ozone ( $O_3$ ), protoxyde d'azote ( $N_2O$ ), les hydrofluorocarbures ( $HFS$ ), l'Hexafluorure de soufre ( $SF_6$ ) ainsi que les perfluorocarbures ( $PFC$ ), participent entièrement à ce phénomène, en empêchant une partie des rayons solaires de repartir

---

<sup>6</sup>appelés gaz à effet de serre

vers l'espace.

Le principe de l'effet de serre permet donc à la température du sol de la terre de se maintenir aux environs de  $15^{\circ}\text{C}$ , sans ce principe, elle serait aux environs de  $-18^{\circ}\text{C}$  ce qui devait empêcher la vie d'exister sur terre.

Parmi les gaz d'effet de serre (GES), le principale est le dioxyde de carbone, qui représente environ 75% des émissions GES mondiales, loin devant le méthane (14%) et le protoxyde d'azote (8%). Le  $\text{CO}_2$  est donc la molécule centrale sur laquelle il est essentiel de se focaliser.

Les différents GES n'ont pas tous le même poids dans le principe d'effet de serre, ni la même longévité dans l'atmosphère. Le méthane ne peut exister dans l'atmosphère que pendant une douzaine d'années après son émission, alors que le  $\text{CO}_2$  vie une centaine d'année avant de se désintégrer.

Si l'on veut comparer les effets de ces GES, on peut mesurer l'effet de chaque gaz à celui qu'aurait une tonne de  $\text{CO}_2$  c'est à dire un effet équivalent à l'émission de  $\text{CO}_2$ . Nous faisons donc appel au pouvoir de réchauffement global (PRG), qui est un outil qui analyse l'impact de l'émission d'une tonne de  $\text{N}_2\text{O}$ , de méthane, par équivalence avec une tonne de  $\text{CO}_2$  sur une période de 100 ans. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci dessous:

Le tableau ?? montre que l'émission d'une tonne de méthane a le même effet sur l'atmosphère que l'émission de 25 tonnes de  $\text{CO}_2$ . Une tonne de l'hexafluorure de soufre émise augmente autant l'effet de serre que 22800 tonnes de  $\text{CO}_2$  émises. Les GES une fois émis sont soit réabsorbés par la biomasse c'est à dire les êtres vivants et les végétaux via la photosynthèse, ou les océans, ou soit seront stockés jusqu'à leur destruction par des processus chimiques.

Gaz	Equivalent $CO_2$
Dioxyde de carbone	1
Méthane	25
protoxyde d'azote	298
perfluorocarbures	5700 à 11900
Hexafluorure de soufre	22800
Hydrofluorocarbures	12 à 12000

Table 1.1: Source:GIEC, 1<sup>er</sup> groupe de travail, 2007

### 1.1.1.2 L'origine humaine du réchauffement climatique

Au cours des 10.000 dernières années, l'évolution du climat terrestre a été impacté que par les influences astronomiques et des phénomènes géophysiques. Les activités humaines pendant toutes ces années n'avaient aucune grande influence sur le climat. Cependant, la stabilité climatique s'est vue perturber juste après la grande révolution industrielle, suite à l'accélération de l'activité économique des hommes. Le dernier rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) stipule que les activités humaines ont entraîné une hausse des émissions mondiales de GES de 70% entre 1970 et 2004 avec une forte concentration du  $CO_2$  suite à son augmentation de 80% dans l'atmosphère.

La perturbation du climat par les activités humaines peut s'expliquer par l'utilisation des sources d'énergie fossiles comme le charbon dans un premier temps, le pétrole et le gaz pour l'industrie et le transport dans un second temps. Il faut aussi noter la contribution du développement agricole au déséquilibre climatique suite à des progrès réalisés dans le domaine technologique. La mise en culture des nouvelles terres agricoles a entraîné une destruction des réservoirs importants du carbone qui sont les forêts et les prairies, l'ulitisation des engrais de synthèse à base d'azote qui produisent

une quantité des protoxydes d'azote ayant une puissance de rechauffement 200 fois plus élevée que celui du  $CO_2$  déséquilibre énormément le climat. Il ne faut pas oublier le développement massif de l'élevage de bovins qui émettent une grande quantité de méthane après leur digestion. Toutes ces activités ont permis l'augmentation du stock des GES dans l'atmosphère qui est passé de 280 particules par million (ppm) avant la révolution industrielle à 430 ppm de  $CO_2$ . Il y a plus de 30 millions de tonnes de  $CO_2$  rejetées dans l'atmosphère chaque année.

Le rapport du GIEC présenté dans le tableau ??, montre après structuration par secteurs d'émission le niveau des GES: Le secteur de l'énergie<sup>7</sup> (25.9%), de l'industrie<sup>8</sup> (19.4%), Utilisation des terres<sup>9</sup> (17.4%), Agriculture<sup>10</sup> (13.5%), Transport<sup>11</sup> (13.0%), Bâtiments résidentiels et commerciaux<sup>12</sup> (7.9%), et de Déchets et eaux usées<sup>13</sup> (2.8%).

Le dérèglement climatique actuel est le résultat de la combinaison de ces différents GES issus du processus de développement des pays industrialisés et émergents partant de la première révolution industrielle de 1840, suite à l'utilisation, de l'énergie fossile (charbon) et de la création de la machine à vapeur. L'utilisation en grande quantité des énergies fossiles a donné à

---

<sup>7</sup>Hors raffineries, fours à coke, etc., repris dans le secteur Industrie.

<sup>8</sup>Raffineries, fours à coke, etc., inclus.

<sup>9</sup>Inclue les émissions de  $CO_2$  imputables à la déforestation, à la dégradation (décomposition) de la biomasse aérienne après déboisement et déforestation, aux feux de tourbe et à la décomposition des sols tourbeux asséchés.

<sup>10</sup>Incinération des déchets agricoles et brûlis de savane inclus (hors  $CO_2$ ). Les émissions de  $CO_2$  et / ou l'absorption par les sols agricoles ne sont pas prises en compte ici.

<sup>11</sup>Transport international (soutes) inclus, hors pêcheries, machines et véhicules agricoles et forestiers tous-terrains.

<sup>12</sup>Utilisation traditionnelle de la biomasse incluse.

<sup>13</sup>Inclue les émissions de  $CH_4$  imputables aux sites de décharge, de  $CH_4$  et de  $N_2O$  provenant des eaux usées, et de  $CO_2$  issues de l'incinération des déchets (carbone fossile exclusivement.)

Secteur	Part des émissions des GES
Energie	25.9%
Industrie	19.4%
Utilisation des terre( déforestations)	17.4%
Agriculture	13.5%
Transport	13.0%
Bâtiments résidentiels et commerciaux	7.9%
Déchets et eaux usées	2.8%

Table 1.2: Source:GIEC, 4<sup>ème</sup> rapport du 3<sup>ème</sup> groupe de travail, 2007

l'homme le pouvoir d'être comparable aux différentes forces géologiques. Ce dernier est désormais capable de destabiliser l'équilibre climatique en participant à la modification de la structure gazeuse de l'atmosphère par la déforestation et l'élevage qui produisent des émissions de dioxyde de carbone et de méthane.

### 1.1.1.3 Les impacts du réchauffement climatique

La hausse de la température terrestre a déjà des impacts considérables sur le mode de vie des êtres vivants sur cette planète, et cela va continuer à se détériorer puisque le réchauffement climatique issu de l'activité humaine devrait se poursuivre dans les années à venir. En effet en 2050 selon le GIEC, le stock de GES serait de 550ppm, ce qui représente le double de ce que la planète disposait pendant la période de la grande révolution industrielle européenne. Le GIEC proposait dès sa création des mesures pour réduire des émissions des GES sous un certain seuil. Sans la mise en place de ces mesures, les GES devraient augmenter de 25 à 90% entre l'année 2000 et 2030.

Cette montée spectaculaire est le résultat de l'utilisation sans modération

des énergies fossiles. De la manière dont vont les choses, d'ici 2030, la température terrestre va atteindre des seuils jamais observés et supérieur à ceux constatés au cours du 20<sup>e</sup> siècle, et qui va continuer d'augmenter d'environ  $0.2^{\circ}\text{C}$  par intervalle de chaque 10 ans; et si aucune décision est prise pour limiter les émissions des GES, la probabilité pour que la température augmente à  $5^{\circ}\text{C}$  est de 50% (*Figure??*).

Le réchauffement climatique aura donc selon le GIEC des conséquences désastreuses. Si la température de la terre continue d'évoluer à ce rythme, elle va provoquer une fonte des calottes glaciaires située dans les zones polaires, entraînant une montée de niveau de la mer, détruisant en son passage des terres habitables. Les effets du changement climatique se constatent déjà de nos jours par l'augmentation de la sécheresse surtout en Afrique et en Inde où la désertification s'accélère, empêchant aux paysans de réaliser de bonnes récoltes par une tarification des points d'eau. Il y a l'augmentation du niveau de pollution en Chine suite à son industrialisation détruisant l'écosystème et entraînant un mal être environnemental surtout dans des grandes villes. Pour éviter un aggravement du dérèglement climatique, la communauté scientifique préconise de limiter la température terrestre de  $2^{\circ}\text{C}$  pour pouvoir stabiliser les effets des impacts qui seraient insupportables pour les écosystèmes et la vie humaine.

Rappelons les résultats du rapport de la Croix Rouge (Fig.??) qui souligne que le nombre de catastrophes naturelles s'est accéléré entre 1970 et 1990. Juste après les années 2000, il y a eu une stabilité des catastrophes comprises dans un intervalle de 120 à 150 par année.

De la manière dont vont les choses, tempêtes violentes, ouragans, inondations, typhons, sécheresses; les événements climatiques extrêmes vont avoir un coût de l'ordre de 0.5% à 1% du produit intérieur brut (PIB) chaque année dès 2050.

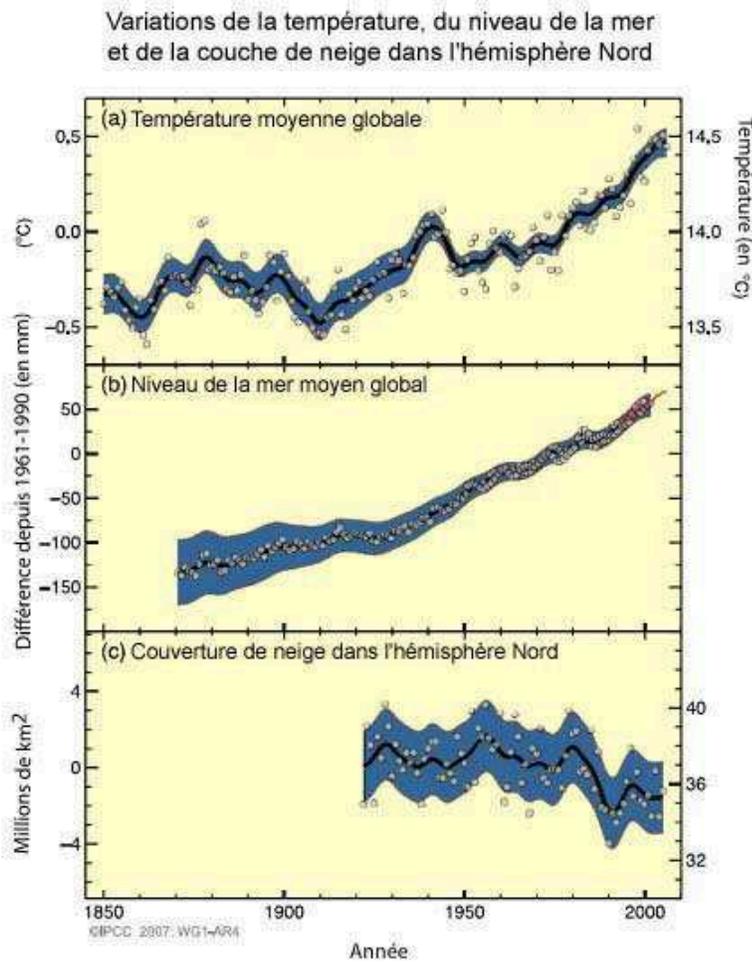


Figure 1.2: Source: GIEC.

Le rapport Sigma de Swiss Ré indique qu'une augmentation de 2<sup>0</sup> à 3<sup>0</sup>C des températures entraînerait une perte permanente d'environ 0% à 3% du produit intérieur brut, pour un réchauffement de 5<sup>0</sup> à 6<sup>0</sup>C, la perte serait de 5% à 10% du produit intérieur brut mondial, avec des coûts supérieurs à 10% du PIB pour les pays en développement.

L'on peut également citer l'étude de Parry et al (2009), qui évalue les coûts

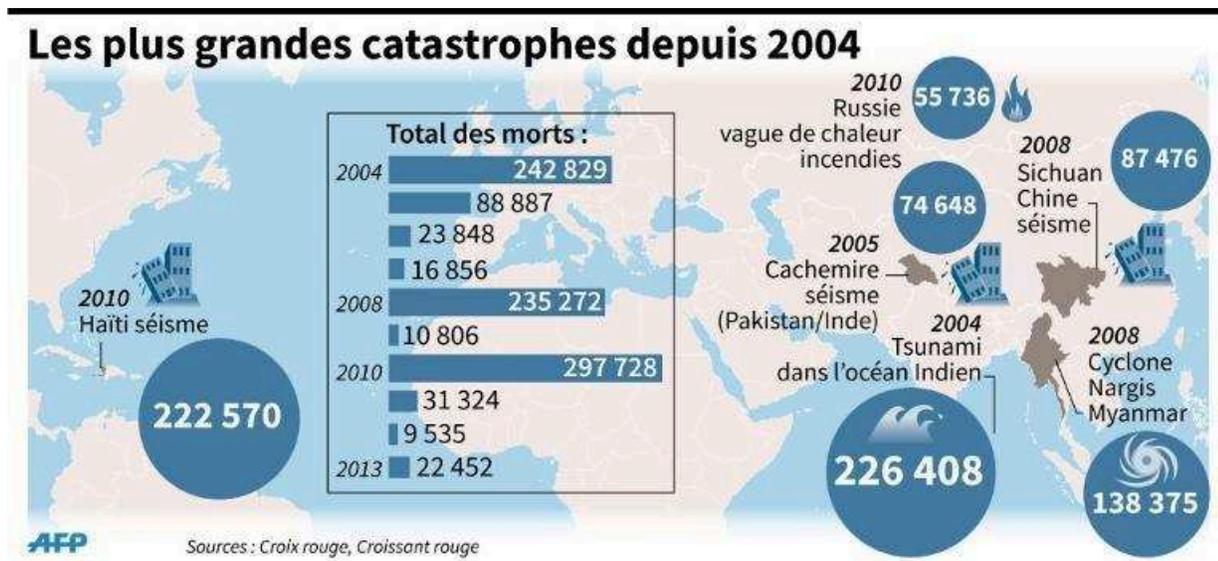


Figure 1.3: Source: Croix Rouge

annuels du réchauffement climatique de 1900 milliards de dollars d'ici 2060 dans le cas où il y a une prise de conscience, alors qu'il est de 2400 milliards de dollars dans une situation de négligence.

Toutes les études sur l'impact financier du changement du climat font état d'un coût particulièrement élevé.

Il existe cependant une corrélation directe entre l'émission de GES et le PIB des nations selon le rapport Stern. Ce qui se confirme par l'activité économique des grandes nations depuis les années 50. En effet les nations industrielles (Amérique du Nord, Europe) ont réalisé environ 70% des émissions de  $CO_2$  connectées à une activité énergétique, alors que les pays en développement ne produisent que 25% des émissions des GES. Avec l'accélération de la croissance économique des pays émergents, le niveau de pollution ne cesse de croître, puisque les pays émergents arrivent à produire plus d'émissions

que les pays industriels.

Selon Rémy Prud'homme (2009), d'ici 2050:

- La chine va émettre environ 35,1% des GES mondiaux, deux fois plus que les Etats-Unis.
- L'inde de son côté émettra 10 fois plus de GES que la France et la moitié de la quantité émise par l'Europe.

La figure ?? montre une carte du monde présentant les émissions de  $CO_2$  par pays. Ce sont des données de l'année 2011, qui ont été recueillies par l'Agence Internationale de l'Energie.

Les 10 pays émettant le plus de  $CO_2$  dans le monde, sont cependant représentés dans le tableau??.

La quantité de  $CO_2$  émise dans le monde ne cesse d'augmenter et cela entraine une modification spectaculaire de l'éco-système de la planète, caractérisée par les fontes des glaces, la sécheresse, la pollution,...

### **1.1.2 Coordination internationale de lutte contre le réchauffement climatique**

La date qui marque le début d'une coordination internationale des pays est celle de 1992 à RIO de Janeiro au Brésil. En effet, la conférence de Rio de 1992 a permis de signer une Convention-cadre des Nations unies sur le changement climatiques (CCNUCC). Ce premier traité international sur le phénomène climatique a rassemblé 178 pays et plus de 600 ONG<sup>14</sup> et, est

---

<sup>14</sup>organisation non gouvernementale

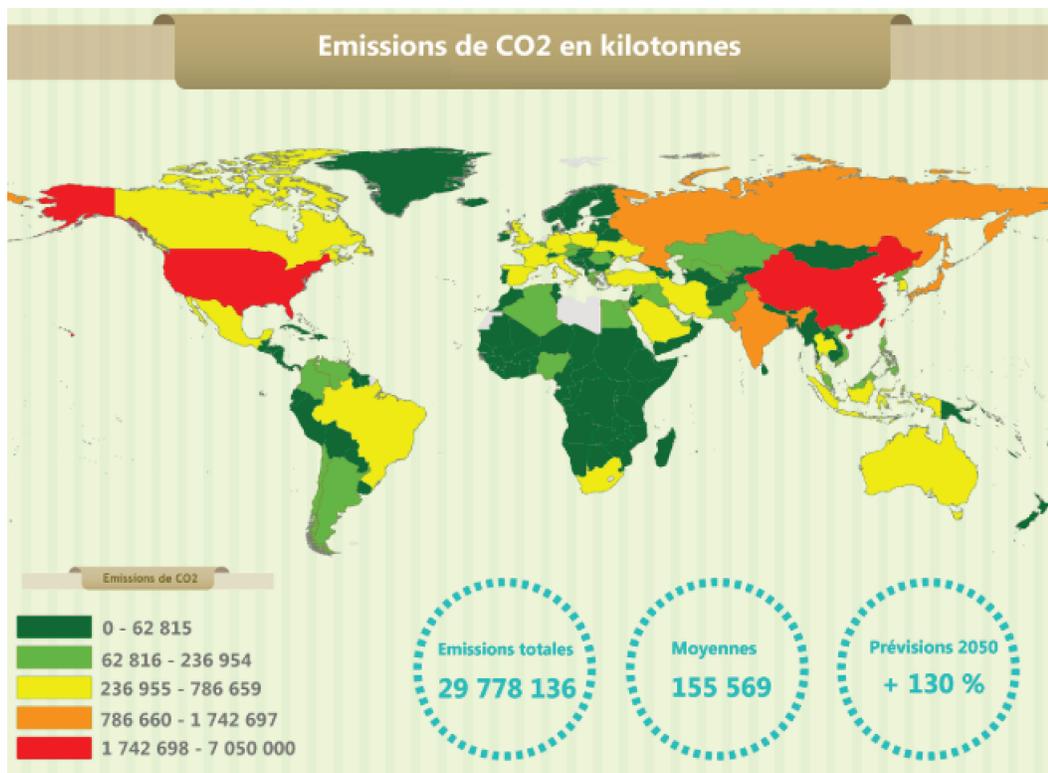


Figure 1.4: Emissions des GES, source : Banque mondiale - 2011

entré en vigueur en 1994, puis ratifiée en 2010 par 194 pays dont les Etats-unis d'amérique. Son objectif principal est de veiller à la stabilisation et à la réduction du stock des GES dans l'atmosphère pour éviter des événements climatiques catastrophiques.

Elle permet aussi de fixer au niveau d'un certain seuil, le niveau de GES dans l'atmosphère dans le but de protéger l'environnement contre toute perturbation anthropique nuisible. Aucun objectif obligeant la réduction des GES a été fixé. Elle a toutefois retenu tous les principes contenus dans la déclara-

Classement	Pays	Emissions de CO2 en kilotonnes	date de l'information
1	Chine	9 019 518	2011
2	Etats-Unis	5305570	2011
3	Inde	2074345	2011
4	Russie	1808073	2011
5	Japon	1187657	2011
6	Allemagne	729458	2011
7	Corée du sud	589426	2011
8	Iran	586599	2011
9	Indonésie	563985	2011
10	Arabie Saoudite	520278	2011

Table 1.3: le classement des 10 pays émettant le plus de CO2 en 2011, source: Banque Mondiale

tion finale de la conférence de Rio, de l'agenda 21<sup>15</sup> et aussi les principes du droit international.

Suite aux constatations observées à Rio en 1992, les différents Etats se sont engagés à mesurer puis à communiquer la quantité des GES émise sur leurs territoires respectifs, à mettre tout en oeuvre pour réduire et ramener leurs émissions au niveau de 1990 , ensuite apporter de l'aide financière aux pays en développement pour les inciter à satisfaire les différents points fixés lors de la convention. Les engagements des différents Etats sont pris sur une base uniquement volontariste. Il y a aucune obligation qui pourra réduire leur souveraineté.

<sup>15</sup>Plan d'action pour le XXI<sup>e</sup> siècle. Ratifié par 173 pays lors du sommet de la Terre, à Rio de Janeiro, en 1992. Il énonce des directives dans des secteurs aussi diversifiés que la pauvreté, la santé, le logement, la pollution de l'air, la gestion des mers, des forêts et des montagnes ...

Pour son bon fonctionnement, la CCNUCC a mis en place trois principes importants que doit respecter la communauté internationale:

1. Le principe de précaution:

Le rapport sur le sommet de Rio fondé sur la coordination internationale des efforts de lutte contre le changement climatique stipule que: « L'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte pour remettre à plus tard l'adoption des mesures urgentes visant à prévenir la dégradation de l'environnement ». Le principe de précaution préconise de prévoir des catastrophes avant qu'il soit trop tard. Cela justifie une action immédiate et coordonnée des pays du globe.

2. Le principe de responsabilité commune mais différenciée:

Le phénomène du réchauffement climatique observé suite aux émissions des GES dans l'atmosphère rend tous les pays du globe responsable du phénomène. En effet, ils participent tous chacun à son niveau à l'émission des GES. Cependant, les pays industrialisés ont une grande responsabilité historique dans ce phénomène, ceci par le fait qu'ils ont été industrialisés bien avant les autres et en plus du fait du niveau du  $CO_2$  qu'ils ont déjà pu émettre dans l'atmosphère depuis le début de l'ère industrielle.

3. Le principe du droit au développement:

La mise en place d'une coordination internationale de lutte contre le réchauffement climatique prend en compte le droit primordial des pays

dits émergents à poursuivre leur développement économique.

La convention cadre des nations unies sur le changement climatique n'a donc pas une influence juridique considérable sur les économies des différents pays. Cette dernière demeure cependant une phase importante dans la protection de la planète car, elle pose les bases d'un cadre institutionnel d'une coordination conjointe des nations pour la lutte contre le réchauffement du globe. Plusieurs autres réunions internationales ont eu lieu et constituent ce que l'on nomme aujourd'hui, conférence des parties (en anglais COP<sup>16</sup>). Chaque année les pays ayant ratifié la CCNUCC se retrouvent au cours de la *COP* pour réfléchir sur la continuation et les négociations des accords internationaux sur le réchauffement climatique.

Ces COP constituent des réunions annuelles d'une grande importance dans le cadre des négociations, des engagements et des stratégies futures à mener pour lutter contre l'augmentation de la température terrestre. La première COP (COP1) est celle qui s'est tenue à Berlin en 1995, les PI se sont accordés de limiter leurs émissions de GES; la seconde (COP2) est celle de Genève en 1996, elle a promulgué que le réchauffement climatique est un danger pour toute la planète; et enfin celle de Kyoto (COP3) en 1997, qui a permis la signature d'un protocole avec des objectifs chiffrés de la baisse des GES.

La dernière conférence annuelle sur le climat (COP21) est celle qui va se tenir à Paris en France du 30 novembre au 11 décembre 2015; juste après celle de:

---

<sup>16</sup>Conférence of the parties

- Buenos Aires (COP4) en 1998, s'est intéressé au contrôle du respect des accords du Protocole de Kyoto a été précisé;
- La Conférence de Bonn (COP5), en 1999, a poursuivi avec l'idée de la conférence de Buenos Aires;
- La Conférence de la Hague (novembre 2000) puis la conférence de Bonn (juillet 2001) (COP6); se sont soldés par les échecs sur les accords portant sur l'organisation du mécanisme de développement propre (MDP) et la mise en place des puits de carbone. Il faut également souligner le refus par les Etats Unis de la ratification du Protocole de Kyoto;
- La Conférence de Marrakech (COP7), en novembre 2001, précise le fonctionnement juridique du MDP et les échanges de crédits d'émission;
- La Conférence de Delhi (COP8), en 2002, s'est soldé par l'adoption d'une méthodologie pour comptabiliser les émissions des GES;
- La Conférence de Milan (COP9), en 2003, a permit la construction des modalités techniques sur le Fonds spécial pour les changements climatiques;
- La Conférence de Buenos-Aires (COP10), en 2004, s'est soldé par l'adoption du plan de Buenos Aires sur l'adaptation au changement climatique destiné aux pays en développement ;
- La Conférence de Montréal (COP11), en 2005, est celle réunissant que des pays qui ont ratifié le Protocole de kyoto;
- La Conférence de Poznan (COP12), en 2006; La Conférence de Bali (COP13), en 2007 ; se sont portées sur les règlements de détails techniques du protocole de kyoto et le plan d'actions en vue d'un accord pour l'après kyoto à *CO15*;

- La Conférence de Poznan (COP14), en 2008, discussions sur la lutte contre la déforestation;
- La Conférence de Copenhague (COP15), en 2009, déclaration finale indiquant l'objectif d'une augmentation des températures inférieure à  $2^0$ , mais absence d'accord pour l'après kyoto;
- La Conférence de Cancún (COP16), en 2010; La Conférence de Durban (COP17), en 2011; La Conférence de Doha (COP18), en 2012; La Conférence de Varsovie (COP19), en 2013; La Conférence de Lima (COP20), en 2014;

Les discussions sur le changement climatique se tiennent alors chaque année aux sommets des COPs qui sont orientées par un secrétariat à Bonn et qui joue un rôle important dans l'organisation et la facilitation d'orientation des débats.

Les Etats se sont engagés à mesurer leurs émissions de GES, transmettre des rapports sur leurs stratégies de protection de l'environnement, réduire les GES à leur niveau de 1990 sur la base du volontarisme et aider les pays en voie de développement (PED) à pourvoir les engagements de la CCNUCC. Toutes les mesures retenues par la CCNUCC pour lutter contre le réchauffement climatique concernaient six GES:

- le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ), provenant essentiellement de la combustion des énergies fossiles et de la déforestation,
- le méthane ( $CH_4$ ), qui a pour origine principale l'élevage des ruminants, la culture du riz, les décharges d'ordures ménagères, les exploitations pétrolières et gazières,
- l'hexafluorure de soufre ( $SF_6$ ), utilisé par exemple dans les transformateurs électriques.

- l'oxyde nitreux ( $N_2O$ ), provient de l'utilisation des engrais azotés et de certains procédés chimiques,
- l'hydrofluorocarbones ( $HFC_s$ ) et
- l'hydrocarbure perfluoré ( $PFC_s$ ), sont les gaz réfrigérants utilisés dans les systèmes de climatisation et la production de froid, les gaz propulseurs des aérosols,

les trois grands principes de fonctionnement: le principe de précaution, le principe des responsabilités communes mais différenciées et enfin le principe du droit au développement que nous avons présenté précédemment ont en effet été retenus par la CCNUCC, afin de faciliter la lutte contre le réchauffement climatique.

Les émissions de GES sont inégalement réparties à travers les pays du monde. Elles représentaient 52% en 2000 pour des pays industrialisés (PI), alors que les pays en voie de développement (PED) n'émettaient que 48% la même année, pour des tonnes d'émissions d'équivalent carbone par personne très différentes<sup>17</sup>.

Cependant, la très forte industrialisation des PED, réduit l'écart d'émission entre ces derniers et les PI.

D'ici 2025, les PED devraient émettre plus de 84% contre 35% pour les PI. La lutte contre les émissions des GES doit tenir compte du développement des PED et, doit se faire au niveau mondial.

La CCNUCC a donc procédé à une classification des pays selon leur responsabilité face au changement climatique tout en tenant compte des préoccupations des PED.

---

<sup>17</sup>3.5 pour les PI contre 0.9 pour les PED

Les pays membres de l'OCDE<sup>18</sup> en 1992 et les pays en transition<sup>19</sup> (PET) sont contenus dans les pays dits de l'annexe I; les pays de l'annexe II ou annexe B renferment tous les pays membres de l'OCDE en 1992 sauf les pays PET. Les pays en voie de développement sont classés dans la catégorie des pays Non-annexe I. Malgré l'énonciation des grands principes de lutte contre l'émission des GES par la CCNUCC, elle n'impose pas les PI à stabiliser ni à réduire leurs émissions. Le protocole de Kyoto est la réponse à cette préoccupation.

La CCNUCC reste toutefois un point essentiel car elle instaure pérennément les fondements d'une relation commune des pays pour la réduction des GES.

#### **1.1.2.1 De l'apparition du rapport Brundtland à la naissance du GIEC**

Le réchauffement climatique observé depuis plusieurs années est vraisemblablement lié aux émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine humaine. Les premières inquiétudes sur ce phénomène remontent aux années 70. En 1979 a eu lieu à Genève la première conférence mondiale sur le climat à l'initiative de deux organismes mondiaux; le programme des nations unies pour l'environnement (PNUE) et l'organisation météorologique mondiale (OMM). Elles ont eu pour rôle d'observer le phénomène de réchauffement climatique, ce qui a conduit à la réalisation d'autres conférences dont la plus importante est la commission Brundtland de 1987, qui est à l'origine du concept de développement durable.<sup>20</sup>

---

<sup>18</sup>L'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE, en anglais Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD

<sup>19</sup> exemple des PET: Russie ou les Etats baltes

<sup>20</sup>Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Rapport Brundtland, 1987

En 1988, la conférence de Toronto a signé une recommandation portant sur une réduction de 20% des GES par rapport au niveau de 1988 à l'horizon 2005. Au cours de cette conférence, le PNUE et l'OMM ont procédé à la mise en place du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (sigle GIEC ou IPCC en anglais). Sa mission est d'évaluer, sans partialité et de façon stratégique, les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique qui permettront à l'opinion publique de bien cerner les risques liés au changement climatique, comprendre les fondements scientifiques des conséquences possibles de ce changement et proposer des stratégies à entreprendre pour lutter contre le réchauffement de la planète<sup>21</sup>.

En 2007 le rapport du GIEC rendait compte d'un accord entre les différents scientifiques du monde sur le problème de réchauffement d'origine humaine de la planète. Avant 2007, les rapports de 1990 et ensuite de 1998 du GIEC faisaient déjà état d'un accord sur le besoin d'une appréciation méticuleuse portant sur l'hypothèse d'un réchauffement climatique et de l'impact de l'activité humaine sur ce phénomène.

La création du GIEC a conduit après la reconnaissance mondiale du phénomène de réchauffement climatique, à la signature lors de la conférence de Rio de la convention cadre des nations des Nations Unies sur ce réchauffement à la signature de deux traités internationaux majeurs:

- La Convention-Cadre des Nations Unies sur le changement Climatique (CCNUCC ou UNFCCC);
- Le protocole de kyoto;

---

<sup>21</sup>Site Internet du GIEC: [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch) dans la rubrique qui sommes nous?

### 1.1.2.2 De la CCNUCC au Protocole de Kyoto

Le protocole de Kyoto (PK) est la deuxième étape la plus importante de lutte contre le réchauffement climatique. Il a été signé en 1997<sup>22</sup> et est entré en vigueur en 2005 après sa ratification par la Russie. Il a été ratifié en 2009 par 141 pays.

L'objectif principal de ce protocole a été la réduction d'émission de GES de 5,2% par rapport à 1990 sur 2008-2012 par des nations faisant partie des pays dit de l'Annexe I qui ont ratifié la convention et la mise en place d'un marché carbone mondial, ce qui représentait une réduction de 28% par rapport aux émissions de GES de 1997. Les pays ayant signé le PK s'étaient engagés de respecter les fondamentaux de la CCNUCC.

Pour aboutir à cet objectif à un coût bas, en réalisant des investissements efficaces orientés vers des projets rentables mais moins polluants, le PK a procédé à la mise en place d'un marché de permis et de deux mécanismes de flexibilité à base de projets, dans le but d'échanger les quotas entre différentes nations afin de réduire l'émission des GES.

- Marché international de quotas carbone : le système "Cap and trade" le marché international de quotas carbone (Figure ??) autorisé par le PK est basé sur le mécanisme de permis qui octroie des Unités des Quantités Attribuées (*UQA*) aux différents Etats de l'annexe-B<sup>23</sup>. Ces unités doivent être égales à leurs différents objectifs d'émissions des GES sur la période de 2008 à 2012. Les différents pays doivent déclarer leurs émissions réelles qui ne doivent pas dépasser les permis détenus. Lorsqu'un pays arrive à réduire ou à dépasser ses émissions par rapport

---

<sup>22</sup>du 1<sup>er</sup> au 10 décembre 1997 au Japon

<sup>23</sup>pays industrialisés

Pays	Réduction
Union européenne à 15 (ainsi que la plupart des pays européens)	-8%
Etats-Unis	-7%
Canada	-6%
Hongrie	-6%
Japon	-6%
Pologne	-6%
Nouvelle-Zelande	0%
Russie	0%
Ukraine	0%
Norvège	+1%
Australie	+8%

Table 1.4: Objectifs de réduction d'émission de GES par rapport aux volumes de 1990 sur 2008-2012; source: GIEC 2007, IEA

à sa capacité réelle, ce dernier peut vendre ou acheter l'excédent aux autres pays de l'annexe-B. Ce marché ne concerne pas tous les secteurs de l'économie<sup>24</sup> et cela réduit son efficacité en créant des déséquilibres entre les différents secteurs de l'économie. Les coûts de mise en conformité aux objectifs de kyoto sont supportés par les seuls PI. Face à cette réalité, les PI avaient refusé de participer à la réduction des GES avec pour seul instrument le système d'échange de quotas s'appliquant qu'à eux. Plusieurs grandes entreprises des PI se sont délocalisées dans les PED pour conserver leurs niveaux d'émissions n'étant pas contraint de respecter la législation du PK. La mise en place de ce système cap and trade a poussé aux industries des PI de partir sans aucun bénéfice en contrepartie pour ces pays. Ces fonctionnements déséquilibrés ont

<sup>24</sup>les secteurs du logements et du transport par exemple ne sont pas inclus

conduit à l'utilisation des mécanismes de flexibilités permettant aux PI de réduire les coûts de leurs émissions de GES afin de respecter les indications du PK.

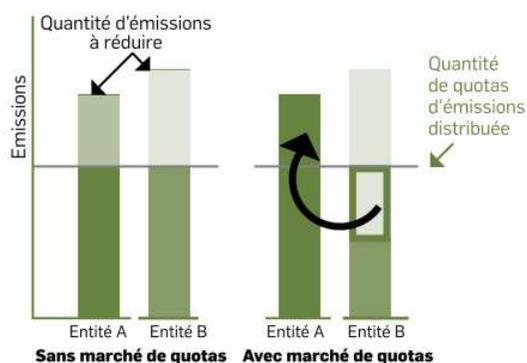


Figure 1.5: Considérons deux entités économiques (pays, sociétés, ou installations) émettrices de GES. Pour atteindre un niveau donné d'émission ( symbolisé par la ligne grise horizontale ), chaque entité peut réduire ses propres émissions (à gauche) ou exploiter la flexibilité donnée par un marché de quota ( à droite ). Dans ce cas l'exploitation du mécanisme de marché implique plus de réductions d'émissions pour les entités dont le coût d'abattement est inférieur.

Source : Mission climat de la caisse de dépôt

- Les mécanismes de flexibilités du protocole de Kyoto:

A côté du Marché international de quotas carbone, existe un autre marché constitué de deux sous mécanismes de flexibilité de financement de projets: la Mise en Oeuvre Conjointe (MOC) (Figure ??) et le Mécanisme pour un Développement Propre (MDP) (Figure ??). ces deux instruments permettent aux différents pays de réduire une partie de leurs émissions en dehors de leur territoire national. Le premier (MOC) est celui qui met en relation deux pays industrialisés et qui consiste à financer des projets dans un pays de l'annexe B, les crédits issus de ces projets sont appelés unités de réduction d'émission (*URE*)<sup>25</sup>. Ce mécanisme ne crée pas de nouveaux crédits mais permet le transfert des unités de réduction d'un pays industrialisé vers un autre pays industrialisé dit pays de l'annexe-B. Lorsqu'une quantité de crédits est transférée d'un pays à un autre, ces derniers s'ajoutent aux quotas du pays investisseur et, une quantité de quota équivalente est annulée dans le pays ou le projet a été réalisé. Le deuxième (MDP) est celui qui permet le financement des projets par un pays industrialisé dans un pays non-annexe-B<sup>26</sup>. Les crédits issus de ces projets sont appelés unités de réduction certifiées des émissions (*URCE* ou certified Emission Reduction (*CER*) en anglais ). Lorsque des *CER* sont créés, il n'y a pas, contrairement aux *URE* de destruction d'*UQA* en contrepartie, puisque le pays qui reçoit ces *CER* n'est pas membre de l'annexe-B. Les projets MDP ont pour objectif d'encourager le transfert de technologie faiblement émettrices.

Le protocole de Kyoto a donc initié des instruments de réduction des émissions des GES et pour atteindre ses objectifs, sur la période 2008-2012, l'union européenne a créé un système européen d'échange de quotas de  $CO_2$  (ETS), dont l'objectif principal est de réduire de 8% les émissions de sa zone.

---

<sup>25</sup>est le crédit carbone obtenu par le système de Mise en Oeuvre Conjointe (MOC)

<sup>26</sup>pays en développement



Figure 1.6: Le transfert des quotas carbone MDP entre deux pays, de l'Annexe B et Non-Annexe; Mission Climat de la Caisse des Dépôts, d'après Unep-Risoe, 2009.

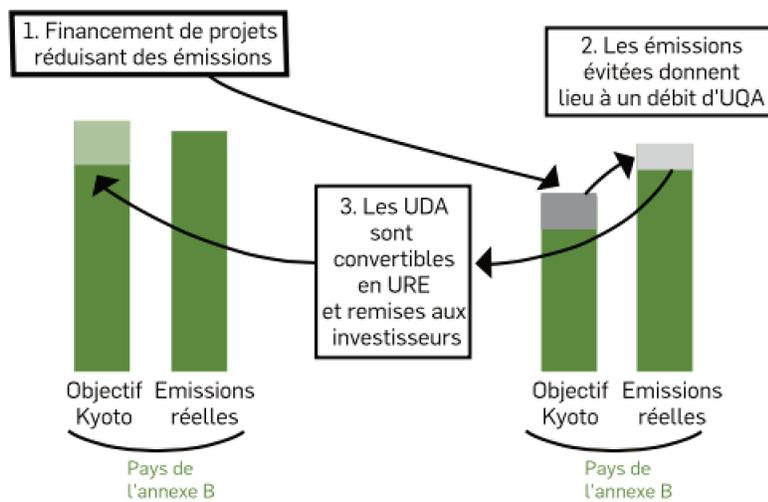


Figure 1.7: Le transfert des crédits MOC entre deux pays de l'Annexe B Mission Climat de la Caisse des Dépôts, d'après Unep-Risoe, 2009.

Le marché européen fonctionne de la même façon que le marché international des quotas de carbone.

Comme nous l'avons déjà précisé plus haut, le protocole de Kyoto est

entré en vigueur le 16 février 2005, mais des transactions MDP et MOC avaient déjà eu lieu avant cette date, alors même que les règles régissant ces transactions n'étaient pas encore clarifiées.

Notons cependant que la conférence de Copenhague de décembre n'a pas en effet conduit à un accord contraignant pour la période post 2012, mais cette question s'est encore posée en 2010 lors de la COP16 qui s'est tenue à Cancun.

### **1.1.2.3 La Conférence de Copenhague**

Avant de présenter la conférence de Copenhague, nous allons dans un premier temps nous pencher sur la conférence de Bali qui a eu lieu en 2007 dont l'objectif était d'analyser les moyens possibles d'une réduction mondiale à long terme d'émission des GES.

Pour aboutir à ces objectifs il faut que les Etats au niveau du globe puissent réfléchir ensemble en vue de mettre en place des instruments efficaces pour lutter contre l'émission . Il était aussi prévu de réfléchir à un mécanisme de financement au profit des pays en développement pour leur permettre de mettre en place ces mesures d'atténuation.

Les modalités des transferts de technologies au profit des pays émergents sont également incluses dans le Plan d'actions de Bali. Ce plan avait mis sur la table les principales questions à résoudre, en particulier le partage différencié de l'effort de réduction des émissions de GES entre PED et PI, n'a pas permis de résoudre ces questions en amont de la conférence de Copenhague.

Le poids croissant des pays en transition comme la Chine, l'Inde et le Brésil, ne donne plus la possibilité aux PI de prendre seuls des décisions lors des grandes réunions internationales. La quote-part, c'est à dire le poids actionnarial de la Chine s'est considérablement renforcé au Fonds monétaire international (FMI) et à la Banque mondiale (BM) dans les années 2000. Son

influence croissante dans le processus des négociations internationales sur le changement climatique rend celui-ci encore plus difficile.

A la fin de la Conférence de Copenhague, la déclaration finale fixait comme date limite le 31 janvier 2010 aux PET pour annoncer leurs objectifs d'atténuation de leurs émissions des GES. La majorité des ces pays n'ont pas rectifié leur attitude par rapport à l'avant Copenhague.

La conférence de Copenhague n'a pu aboutir à un arrangement pour la période suivant celle couverte par le Protocole de Kyoto (2008-2012). Un refus d'engagement de la part des PET de réduire leurs émissions d'ici 2050 s'est observé lors de cette conférence. Ces derniers refusent de réagir avant que les pays industrialisés ne fixent, eux mêmes, des objectifs pour 2020.

La réalisation de ces différentes conférences a permis à l'Union Européenne de mettre en place la plus grande structure de lutte contre les émissions de GES à savoir, le marché européen de permis d'émission<sup>27</sup> qui a été créé par la Directive européenne 2003/87/EC, appelé couramment Directive permis et qui a pour fonction principale de limiter les émissions de GES d'environ 12000 sources fixes de CO<sub>2</sub>, représentant 45% des émissions totales de l'Union Européenne ou environ 6.5 milliards de tonnes équivalent de dioxyde de carbone.

Dans la volonté d'atteindre leur but, ces organismes peuvent limiter leurs émissions, ou acquérir de quotas d'émission Européens auprès des autres organismes qui sont régis par la directive . Cependant, certaines restrictions définies par une seconde directive pèsent sur ces options. Cette directive dite d'emboîtement est celle qui permet d'établir une relation étroite entre l'ETS et le protocole de Kyoto.

---

<sup>27</sup> European Union Emissions Trading Scheme ou EU ETS

L'existence de l'ETS s'étale en ce jour sur trois périodes:

- La première a commencé le 1er janvier 2005 et a pris fin en 2007. C'était la phase pilote du marché pendant laquelle les agents ont reçu gratuitement des quotas. Les entreprises industrielles ont pu pendant cette période apprendre le fonctionnement du nouveau marché. Elles ont développé des stratégies afin de réduire les émissions de GES. Cette première phase a permis l'installation des infrastructures nécessaires pour la préparation de la deuxième période et la libre circulation des quotas échangés au sein du marché du carbone européen.
- La deuxième période couvre la période de 1 janvier 2008 au 31 décembre 2012. Cette seconde phase de 5ans est celle respectant les engagements fixés lors du protocole de kyoto. L'objectif de cette phase était de réduire le niveau des émissions des GES de 5% par rapport à celui de 2005, suite à la baisse contracté dans la première phase.
- La troisième phase va couvrir une période de 8 ans allant du 1er janvier 2012 au 31 décembre 2019. Le système de vente aux enchères sera utilisé pour écouler une partie des quotas qui seront échangés pendant cette phase. Pour encourager les Etats qui vont s'efforcer de baisser leur niveau d'émission des GES, la commission Européenne propose de répartir par solidarité 10% des produits des enchères à certains gouvernements Européens et 2% seront alloués aux gouvernements qui ont pu baisser de 20% leur niveau d'émission de GES par rapport au niveau qu'ils avaient en 2005.

## 1.2 Le fonctionnement du marché Européen de permis d'émission

### 1.2.1 Origine et développement du marché carbone

Le SCEQE puise ses origines à la suite de deux échecs majeurs dans le processus de lutte contre le réchauffement climatique. Le premier échec est celui des années 90, résultant de la volonté de l'introduction d'une taxe pan-européenne sur l'émission de dioxyde de carbone issus des secteurs de l'énergie. Ensuite, dans la lutte lors du protocole de kyoto en 97 contre la mise en place d'un mécanisme de flexibilité et de transfert de permis de pollution.

Ces deux échecs ont incité l'Union Européenne à mettre sur pieds ce qui deviendra par la suite le plus grand marché de lutte contre le rechauffement climatique du monde.

En 1992 deux groupes antagonistes se sont affrontés à la suite de la proposition par la commission européenne d'une taxe sur les émissions de  $CO_2$ . Certains Etats se sont opposés à cette taxe, en voulant leurs independences en matière fiscale qui leurs confèrent une souveraineté nationale tout en acceptant de lutter contre le rechauffement climatique. Des grandes firmes énergétiques se sont aussi opposées. Cette opposition vigoureuse a entraîné l'abandon par la commission Européenne de la taxe carbone-énergie en 1997.

Lors du protocole de kyoto de 1997 réalisé au japon, trois positions ont été soutenues par UE :

1. Une coordination entre les pays développés sur des plafonds d'émission à respecter.

2. Une possibilité indifférenciée de tous les pays de réduire de 15% l'émission des GES en dessous des niveaux d'émissions de 1990.
3. Les objectifs de réductions de GES ne peuvent pas passer par la mise en place des systèmes d'échange de quotas, puisque les intervenants disposant de quotas excédentaires (ou air chaud), vont en profiter sans pour autant faire des efforts tout en compromettant le but à atteindre.

Les pays ayant participé au protocole de Kyoto se sont majoritairement prononcés sur le système de plafonnement et d'échange de quotas (cap and trade) rejetant d'un seul bloc la réduction de 15 % et l'objectif indifférencié proposé par l'Union Européenne. Le protocole de Kyoto de 1997 avait retenu un système d'échange de quotas et deux autres instruments de flexibilité (le mécanisme pour le développement propre (MDP) et la mise en œuvre conjointe (MOC)), qui 6 mois après leur adoption se sont structurés comme le nouveau terrain d'activité stratégique de l'Union Européenne.

Le marché Européen de carbone s'est donc consolidé après une prise de conscience de la part des intellectuels qui l'ont considéré et reconnu comme un instrument de flexibilité politique. L'instrument européen s'est fortement inspiré de l'expérience des Etats Unis d'Amérique en matière d'échange de quotas d'émission (le programme "Acid Rain") qui a facilité la baisse des émissions de dioxyde de soufre des centrales électriques américaines à des coûts très faibles par rapport aux politiques alternatives envisagées<sup>28</sup>. En se rapprochant du modèle des Etats Unis d'Amérique (programme Acid Rain), l'union européenne a eu accès à une grande documentation et expérience lui permettant d'éviter des nombreuses erreurs commises par les Etats Unis à ses tous débuts.

---

<sup>28</sup>La construction détaillée de ce programme, ses caractéristiques et ses performances écono-environnementales ont été présentés par Ellerman et al.(2000)

### 1.2.1.1 Stratégie Européenne face au changement climatique

La lutte contre le réchauffement climatique par l'Union Européenne (EU) s'est structurée par la création d'une plateforme stratégique: "Système communautaire d'échange de quotas d'émission (SCEQE). Contrairement au mécanisme de flexibilité instauré lors du protocole de Kyoto qui faisait directement intervenir les pays dans les échanges, le SCEQE s'occupe principalement des échanges de quotas entre les différents centres Européen émetteurs de GES qui sont au nombre d'environ 12000. L'union Européenne propose chaque année et non pas cinq comme le protocole de Kyoto, un contrôle sur ces différentes installations.

Dans sa stratégie de lutte contre les GES, l'UE demande à chacune des installations de remettre le 30 avril de chaque année aux Etats respectifs une quantité équivalente des quotas correspondants au volume des GES émit l'année précédente. Les nouvelles allocations pour l'année en cours sont allouées chaque 28 février aux différentes installations. Sur la période allant de 2008 à 2012, une quantité de 2,1 milliards de quota seront distribués chaque année, ce qui entrainera une limite d'émission de GES à 2.1 GtCO<sub>2</sub>e par année<sup>29</sup>. Les installations reçoivent donc pendant le mois de mars et avril une double allocation, les volumes de quotas de l'année passée auxquels viennent s'ajouter celui de l'année en cours.

Toujours dans la stratégie de lutte contre le dérèglement climatique, chaque pays membre de l'UE a procédé selon la directive européenne 2003/87, à la mise en place d'un Plan national d'affectation de quotas (PNAQ). En France par exemple, l'article L.229-16 du code de l'environnement a permis la mise en place du Registre national des quotas d'émission de GES suite au décret du 23 décembre 2004. Ce registre national Français portant le nom de Seringas. Il est géré par la Caisse des dépôts et consignation (CDC).

---

<sup>29</sup>1EUA= 1tonne CO<sub>2</sub>e

Mais, les comptes consignés sur le registre Seringas peuvent être tenus par des exploitants et également par les institutions non exploitants comme les ONG<sup>30</sup>, les IF<sup>31</sup> et même les simples particuliers.

Les installations nationales qui reçoivent des allocations de la part des pouvoirs publics ont la possibilité de les échanger avec d'autres installations industrielles de l'UE et même avec celles qui sont hors de cette zone. Cette stratégie est très intéressante dans le sens, ou elle permet aux pays de l'UE de respecter le protocole de Kyoto tout en facilitant l'accès aux entreprises de cette zone d'acheter ou de vendre leur quota sur le marché carbone. Les installations d'émissions de  $CO_2$  de l'UE ont donc intégré dans leur fonctionnement les stratégies d'interventions sur des marchés gré à gré (sans intermédiaire) ou sur d'autres plateformes de marché, leur permettant d'être plus efficace dans la lutte contre le réchauffement climatique.

Lorsqu'une firme arrive à baisser ses émissions plus que la quantité de quotas qu'elle détient, elle peut permettre aux autres entreprises d'acheter ses quotas non utilisés. Mais toutefois, la firme dispose d'une quantité de quotas inférieure au niveau d'émission des GES, dans ce cas, cette dernière peut procéder à plusieurs stratégies:

- Utiliser des nouvelles technologies qui émettent moins des GES
- Se présenter sur le marché carbone afin d'acheter un surplus de quotas
- Investir dans des projets verts<sup>32</sup> afin d'acheter des crédits carbone

### **1.2.1.2 Les instruments de lutte contre le changement climatique**

Pour lutter contre le réchauffement climatique, plusieurs stratégies ont déjà été utilisées en ce jour; telles que l'interdiction de la production de certains

---

<sup>30</sup>Organisme non gouvernemental

<sup>31</sup>institutions financières

<sup>32</sup>MDP MOC

gaz à effet de serre (pour les chlorofluocarbures) lors du protocole de Montréal en 1987. Cependant, plusieurs GES ne peuvent pas être interdits à court terme du fait de leur importance et de leur utilisation dans plusieurs activités de production humaine. Suite à cette difficulté d'interdiction stricte de certains GES, deux mécanismes économiques (écotaxe et quotas) ont été développés afin de permettre aux industriels de participer à la réduction des GES en investissant dans des technologies nouvelles générations qui émettent des faibles quantités des GES.

L'écotaxe permet d'inciter les investisseurs d'intégrer dans leurs prévisions d'investissement le coût associé aux émissions de GES. En effet la mise en place d'une taxe permet de fixer le prix que l'on doit payer par tonne de carbone émise. Il est néanmoins impossible de déterminer le montant exact de cette écotaxe pour qu'elle influence entraîne une réduction considérable des GES. Ceci est dû au fait que cette taxe est fixée administrativement et donc demanderait la prise en compte de plusieurs paramètres et surtout des informations plus détaillées sur les coûts. En effet, chercher à réduire les émissions de GES par le contrôle des prix est très risqué, puisque cette stratégie ne prend pas en compte les quantités produites. Elle permet de connaître le prix de vente en avance, mais pas la baisse du niveau de la quantité des GES qui sera réalisée par la suite.

Il faut cependant souligner qu'au cours des années 90, l'Union Européenne avait essayé d'introduire une écotaxe européenne mais ce projet s'était soldé par un échec. Il y a cependant plusieurs scientifiques qui continuent de lutter en faveur d'une écotaxe qu'ils jugent plus simple et plus honnête; c'est le cas du Docteur James Hansen qui est l'un des climatologues les plus éminents de la NASA qui demandait au cours de la conférence de Copenhague de mettre en place un système de taxe pour lutter contre le réchauffement climatique.

Cependant, dans un système de marché du type cap and trade (plafonnement et échange) on commence tout d'abord à fixer la quantité d'émission.

Cette stratégie est considérée comme par la plus avantageuse par plusieurs économistes puisqu'elle sous-tend une obligation de résultat. Le prix c'est à dire le coût de la tonne de  $CO_2$  dans cette stratégie reste inconnu et offre en revanche aux industriels peu de visibilité. Le système de quota d'émission permet de connaître dès le début du cycle la quantité d'émissions; mais le coût par tonne émise par les industriels ne sera connu qu'à la fin de la période d'exercice.

Le débat sur l'instrument le plus efficace à utiliser entre l'écotaxe et le marché carbone continu à occuper les discussions entre les économistes et les scientifiques. Il serait très difficile qu'une écotaxe puisse s'imposer face à une stratégie de réduction de GES par un marché. Puisqu'en effet la stratégie par les quotas est largement installée sur la planète, avec le protocole de Kyoto et depuis 2005 avec le système communautaire d'échange de quotas d'émissions (SCEQE) Européen.

Il existe au niveau mondial, un seul prix carbone qui influence considérablement tous les autres prix issus des différents marchés sur toute la surface du globe. Ce prix est celui de l'unité de quota carbone Européen (EUA). Tous les analystes et décideurs du marché carbone se focalisent principalement sur le prix mondial.

Le marché carbone dispose donc des quotas qui peuvent être échangés directement entre les différents détenteurs ou via un système d'intermédiation. Ces quotas de carbone sur ce marché peuvent également être échangés via des plates formes de marché.

Les acteurs du marché avant toute intervention, doivent tout d'abord prendre connaissance de l'existence des prix de marché qui sont déterminés en fonction des offres et de la demande, et dans le même sens des volumes

de transaction des quotas carbone.

Les différents types d'instruments financiers sont déterminés à partir de leur mode de création. Nous disposons de 3 types de prix qui interagissent sur 2 différents marchés. Le prix EUA<sup>33</sup>, le prix de CER<sup>34</sup>, qui se présente dans certaines limites comme substitut au prix EUA et enfin le prix ERU<sup>35</sup>.

- Prix du quota du carbone : Prix EUA

Ce prix EUA est celui des quotas issus des attributions par les pouvoirs publics dans le cadre du système communautaire d'échange de quotas d'émissions (SCEQE), que l'on appelle souvent par unités de quantité attribuée, ou allocation. Ce type de quota est aussi appelé EUA pour European Union Allowance sur le marché européen.

- Prix du crédit carbone : Prix CER

Le CER (Certified Emission Reduction), c'est un crédit carbone issu du mécanisme de développement propre (MDP). Les crédits carbone peuvent être utilisés par des pays de l'annexe 1<sup>36</sup> afin de se conformer à leurs objectifs de limitation des émissions ou des exploitants des installations couvertes par le Système européen d'échange d'émissions (SCEQE) afin de se conformer à leurs obligations de restituer les quotas de l'Union Européenne.

---

<sup>33</sup>unités de quantité attribuée

<sup>34</sup>Certified Emission Reduction

<sup>35</sup>Emission Reduction Unit

<sup>36</sup>Les pays de l'Annexe 1 sont des pays industrialisés qui ont ratifié le protocole de kyoto

Les crédits carbone CER peuvent être détenus par des entités gouvernementales et privées sur les comptes électroniques et ces crédits peuvent être achetés sur le marché primaire ou sur le marché secondaire.

- Le Prix du crédit carbone : Prix ERU

L'ERU (Emission Reduction Unit) est comme le CER, un crédit carbone obtenu par le système de mise en oeuvre conjointe. L'ERU est une unité de négociation en vertu du Protocole de Kyoto et qui représente une réduction des gaz à effet de serre sous la mise en uvre du mécanisme conjointe, où ce crédit représente une tonne de CO2 équivalent réduit.

Les prix sur le marché de l'EUA, du CER et enfin celui de l'ERU possèdent une légère différence.

Le prix de L'EUA est normalement celui qui est le plus élevé, car une détention de ce quota en quantité suffisante permet à une entreprise qui la détienne de remplir sa cible d'émission.

L'ERU et le CER sont sur deux marchés soumis à des restrictions pour leur utilisation dans le cadre de l'ETS. Cependant, l'offre de ces deux crédits dépend également de plusieurs autres facteurs, en particulier celui du nombre des projets de Mise en Oeuvre Conjointe (MOC) et le Mécanisme pour le Développement Propre (MDP).

Les allocations et les crédits carbone peuvent toute fois être échangés, soit au comptant (spot) qui renvoie à une échange entre le paiement en numéraire et le transfert du quota qui s'effectue juste après la transaction. soit, sous forme de contrat futures qui sont sur le marché carbone considéré comme des engagements d'acheter ou de vendre un quota à un instant précis.

Les contrats futures détenus par un acteur intervenant sur le marché future lui donne cependant l'obligation d'acheter ou de vendre l'instrument financier sous-jacent (des EUA, CER ou ERU ) à un prix déterminé et fixé à l'avance.

### **1.2.1.3 Les différents échanges sur le marché Carbone**

Depuis la création du SCEQE plusieurs infrastructures ont pu voir le jour afin d'assurer les transactions financières relatives aux émissions des GES. Ces infrastructures encore appelées bourses carbone ou plates-formes d'échange permettent la mise en relation entre les vendeurs et les acheteurs des actifs financiers du carbone. La particularité des bourses carbone réside du fait qu'elles permettent la mise en relation entre différents agents en leur facilitant d'échanger les actifs financiers tout en assurant la vente des quotas à un prix très stable entraînant une grande circulation de liquidité aux quotas et aux crédits carbone.

Les agents du marché carbone peuvent également participer à des échanges gré à gré, en s'échangeant directement des quotas et/ou des crédits carbone avec d'autres agents. Le prix et les quantités échangés dans un tel système d'échange sont déterminés par les agents intervenants. Afin de pouvoir contrôler le marché secondaire, les gouvernements des Etats Européens trouvent préférable que les échanges entre les agents soient réalisés non pas dans un système gré à gré mais sur des bourses d'échange carbone.

Il existe également l'échange intermédié, qui contrairement aux gré à gré fait intervenir un intermédiaire qui participera à la vente en aidant l'acheteur et le vendeur sur la détermination du prix d'échange des quotas et/ou crédit carbone. La majorité des crédits internationaux issus du protocole de Kyoto s'échange aux gré à gré.

#### **1.2.1.4 Les différents opérateurs sur le marché Carbone Européen**

Avec l'accélération du réchauffement climatique et les normes mises en vigueur par les gouvernements Européens après le protocole de kyoto, l'on constate une augmentation des activités commerciales sur le marché du carbone. Ces activités sont dues à l'intervention de plusieurs agents ayant des stratégies de vente ou d'achat différentes. Parmi ces intervenants, nous avons:

##### **Les Courtiers**

Les courtiers ont pour rôle sur le marché carbone de développer des meilleures stratégies de vente ou d'achat, de trouver des contreparties sur certains échanges effectués de gré à gré afin de permettre à des particuliers ainsi qu'aux entreprises qui obéissent aux normes du SCEQE de pouvoir optimiser leur portefeuille financier tout en respectant la politique de réduction d'émission des GES.

##### **Les Entreprises financières orientées sur les MDP**

La mise en oeuvre d'un marché sur les MDP, mecanisme pour le developpement propre issu du protocole de kyoto, a permit la naissance d'un nouveau genre d'agents financiers<sup>37</sup> jouant le rôle d'intermédiaire entre les entreprises travaillant pour le développement des projets et les acheteurs des crédits carbone issus de ces projets. Tous les projets MDP sont répertoriés sur le site [www.cdmbazaar.net](http://www.cdmbazaar.net) par les Nations Unies qui considèrent les Entreprises financières qui travaillent sur les MDP comme des prestataires de service. Le marché CDM Bazaar des nations Unies dispose de 3 sections:

---

<sup>37</sup>Saras Environment Consultant, Bali international consulting Group, Ecosecurities,...

- La section des vendeurs: affiche leurs profils et tous les projets qui viennent juste s'ajoutés.
- La section des acheteurs: indique les profils des investisseurs dans les projets.
- Les fournitures des services: recensement des profils des entreprises qui sont spécialisées dans les innovations technologiques pour la lutte contre les émissions des GES.

Toutes les informations concernant les MDP qui sont données par le site Bazaar permettent aux différents agents initiateurs de nouveaux projets de pouvoir trouver sans difficultés des agents ou des entreprises pouvant les financer et investisseurs dans les projets. Le site CDM Bazaar géré par les Nations Unies permet donc de suivre sans difficultés les différents processus d'élaboration des projets jusqu'à la création des Crédits Carbone (CER).

## **Les Entreprises productrices des instruments financiers**

Suite aux fluctuations des prix sur le marché carbone, certaines entreprises<sup>38</sup> proposent des outils financiers aux entreprises polluantes qui cherchent à se couvrir face aux risques qu'elles encourent sur le marché carbone. Les entreprises productrices des instruments financiers effectuent des grands nombre d'opération sur le marché carbone en travaillant également pour leur propre compte.

---

<sup>38</sup>Les grandes banques d'affaires, les entreprises spécialisées: Trafigura ou vitol par exemple

### 1.2.2 Les Secteurs concernés par le SCEQE

La lutte contre le réchauffement climatique se focalise aux grands secteurs polluants de la planète. Pour ce qui est SCEQE, toutes les installations de combustion disposant d'une puissance au dessus 20 MW<sup>39</sup> sont en effet concernés<sup>40</sup>. Parmi ces installations l'on peut citer :

- Les chaudières,
- Les réseaux de chauffage urbain,
- La production et la transformation de métaux ferreux : production de fonte et acier,
- Les turbines à combustion du secteur de l'industrie,
- Les moteurs à combustion du secteur de l'industrie,
- Les papiers et carton
- Les industries minérales : ciment , chaux, verreries, les produits céramiques par cuisson,
- Les centrales thermiques,
- Les raffineries de pétrole

Ces différents secteurs installés sur le marché carbone européen émettent environ 2 milliards de tonnes de  $CO_2$  chaque année. Cette quantité représente environ 40% du total des émissions des GES émise par les pays Européens.

---

<sup>39</sup>mégawatt, soit un million de watts (unité dérivée du système international pour qualifier une puissance, un flux énergétique ou un flux thermique)

<sup>40</sup>Toutes les entreprises d'incinérateurs de déchets menagers ou qui sont dangeureux ne sont pas prises en compte

Chaque année, le 15 février au plus tard, les industriels et les différents agents qui interviennent sur le marché carbone Européen, sont dans l'obligation de déclarer leurs émissions de l'année précédente. Après la déclaration, un inspecteur vérifie toutes les informations. Si toutefois une entreprise dispose d'un déficit d'allocation compte tenu de sa quantité de GES émise, l'inspecteur met par un procès verbal l'entreprise en demeure de remplir toutes ses obligations dans des délais de 1 mois. Toutes les informations sont transmises au préfet qui veille au respect des décisions qui ont été prises.

Dans le cas où l'entreprise ( ou un agent ) ne respecte pas les accords dans les délais d'un mois qui a été fixé, cette dernière voit automatiquement son nom publié et, va commencer à payer une amende sur chaque tonne excédentaire d'émission de GES. Le taux de pénalité augmente avec le taux annuel du niveau d'inflation de l'Euro. Cela était au départ du marché carbone de 40 euros et est passé juste après 2013 à 100 euros.

### **1.3 Conclusion**

Le climat de la planète est en mutation totale. Cette transformation a en effet incité les dirigeants politiques de mettre en place un système de contrôle climatique, la finance carbone, qui est en pleine expansion. Après le protocole de Kyoto, les Etats Européens avaient décidé de lancer le Système communautaire d'échange des quotas d'émission (SCEQE) afin de pouvoir mettre en exergue certaines stratégies pour lutter contre le réchauffement climatique. Cependant l'une des caractéristiques fondamentales de la finance carbone est l'influence qu'a les pouvoirs publics dans ce secteur en tant que maîtres de l'offre de quotas.

Les aléas de la conjoncture économique permettent de déterminer la demande des quotas, puisque ce sont ces aléas qui déterminent le niveau de la production industrielle et les prix des énergies .

Jusqu'à ce jour, l'avenir de la finance carbone est improbable. Il y a l'absence total d'un consensus global des pays face aux phénomènes du réchauffement climatique. Les résultats scientifiques sur le réchauffement climatique ne sont pas interprétés par tous de la même manière, ce qui bloque l'approbation générale de la finance carbone par l'opinion publique au niveau planétaire. Il est donc nécessaire de développer des grandes stratégies pédagogiques afin de rendre le GIEC plus transparent et compréhensible au grand public.

En effet en dehors de l'Europe, certains pays n'ont pas encore adopté le système d'échanges de quotas d'émission. Il est vrai que la COP21 qui se déroule à Paris montre que le niveau de réduction des GES fixé à au moins -20% en 2020 par rapport à l'année 1990, peut être modifié si un accord international venant à se concrétiser à au moins -30%. Un accord planétaire contraignant est nécessaire pour l'avenir du climat et donc de la planète.

Il faut toutefois souligner que, la connexion entre les crédits issus du mécanisme pour le développement propre (MDP) et la mise en oeuvre conjointe (MOC) n'est pas encore totalement claire. Cependant, l'utilisation de ces crédits carbone impacte fortement la structure du prix du quota carbone du SCEQE.

## Chapter 2

# Analyse multi-échelle du Co-mouvement entre le prix du quota (SCEQE) et du crédit carbone (MDP)

La relation entre le Système Communautaire d'Echange de Quotas d'Emission (SCEQE) et le Mécanisme de Développement Propre (MDP) intéresse aujourd'hui de nombreux pays du monde.<sup>1</sup> Le MDP est considéré comme l'un des principaux outils qui permet aux pays d'augmenter leur rentabilité et de s'acquitter de leurs obligations de conformité issues du protocole de kyoto. Il est considéré, de plus, comme un moyen rentable pour répondre au changement climatique. L'existence d'une relation entre le SCEQE et le MDP peut conduire à une baisse du prix du quota carbone Européen et également à une réduction des coûts de conformités.

La mise en place du système communautaire d'échange de quota d'émission (SCEQE) en janvier 2005 par l'union Européen, est le résultat de la ratification du protocole de kyoto qui s'intéresse à réduire de 8% les émissions de GES par rapport à son niveau de 1990 sur une période de 2008 à 2012. Le

---

<sup>1</sup>Une partie de ce chapitre a été publié (confère Bibliographie numéro 164)

SCEQE est un système de plafonnement et d'échange (principe dit de cap and trade en anglais) des émissions des GES issu des secteurs de l'énergie et des industries polluantes.

Les entreprises productrices de gaz à effet de serre (GES) ont une influence majeure sur le marché européen du carbone, puisqu'elles émettent des quantités de  $CO_2$  qui, parfois, se situent au dessus ou en dessous du volume de quota qui leur est alloué. Elles peuvent alors, dans ces cas, vendre ou acheter leurs excédents aux autres entreprises. Cependant, le plus important pour les entreprises polluantes est la réduction de leurs émissions de  $CO_2$  pour s'acquitter de leurs obligations de conformité issues du protocole de kyoto.

Les entreprises polluantes doivent donc observer l'évolution du prix du quota carbone en l'intégrant dans leur fonction de coûts. Les acteurs développent donc différentes stratégies afin de se couvrir en achetant et en vendant les quotas (EUA) et les crédits (CER) carbone.

Il y a donc plusieurs acteurs qui interviennent sur le marché afin de remplir leur obligation de conformité.

Leurs interventions font que nous observons des agents ne disposant pas les mêmes stratégies d'investissement.

L'objectif de ce chapitre est de formuler une aide aux différents intervenants des marchés leur permettant d'anticiper le comportement des prix EUA et CER, dans le but de minimiser le risque des pertes lors des achats ou des ventes des quotas ou des crédits carbonés. L'analyse de la relation entre l'EUA et le CER, est réalisée dans le domaine temps-fréquence (ondelettes), qui prend en compte le changement d'état de la corrélation entre les deux prix, pour chaque fréquence au cours du temps, et, qui de ce fait, met en

évidence l'hétérogénéité du comportement des différents agents.

L'analyse multirésolution par ondelettes permet de capturer la structure de dépendance des deux séries de prix, et de montrer l'existence de la dynamique complexe sur différentes échelles de temps. L'étude insiste sur la direction de la relation de causalité au sens de Granger des séries brutes et des différentes composantes d'ondelettes sur les bandes de fréquences associées (haute, moyenne et basse).

Nous faisons donc une étude économétrique sur la relation de co-mouvement entre les prix du quota et du crédit carbone, en s'appuyant dans un premier temps sur l'hypothèse selon laquelle, tous les agents ont la même stratégie d'investissement, c'est l'hypothèse proposée par toutes les études économétriques réalisées sur le marché carbone à ce jour, et dans un second temps en prenant en compte les différentes stratégies d'investissement des agents sur le marché carbone.

Nous analysons donc dans ce chapitre la structure du prix du quota carbone, les interactions pouvant exister entre le système communautaire d'échange de quota d'émission (SCEQE) et le mécanisme pour le développement propre (MDP) en faisant intervenir l'hypothèse d'hétérogénéité des comportements des agents sur un marché carbone où co-existe de multiples échelles d'investissements. Pour réaliser cet objectif, nous faisons appel à une approche temps-fréquence (ondelettes) qui permet d'analyser le comportement local d'un signal, en isolant les composantes relatives aux fréquences de trading des agents.

## 2.1 Méthodologie

Pour analyser la coévolution entre les marchés, nous avons fait appel à la transformée en ondelettes. Cette méthode permet d'analyser le comporte-

ment local d'un signal, en isolant les composantes relatives aux fréquences de trading des agents et permet d'analyser les relations de corrélation dynamique entre paires de fréquences correspondantes. Cette technique de zoom est un outil puissant pour détecter et caractériser les irrégularités d'un signal. La transformée en ondelettes est un outil relativement récent dans le domaine des mathématiques appliquées et a été développée par Daubechies.(1992), Chui.(1992) et Graps.(1995). Elle fournit la possibilité de faire des estimations semi-paramétrique pour des structures très complexes, sans connaître la forme fonctionnelle sous-jacente.

Pour un développement plus complet et plus efficace de l'utilisation de la théorie des ondelettes, il faut se référer aux travaux de Percival et Walden.(2000). et de Gençay et al.(2002). Le livre de Stéphane Mallat, une exploration des signaux en ondelettes, présente une grande base d'introduction à l'univers des ondelettes.

Cette analyse permet par l'utilisation d'une fenêtre entièrement évolutive, qui se déplace le long du signal, de capturer le comportement local dans le domaine temporel. Elle transforme les données d'origine en composantes de différentes fréquences, avec une résolution qui correspond à différentes échelles.

Compte tenu du comportement aléatoire des marchés financiers, une analyse par ondelettes est plus appropriée pour saisir le comportement des séries non stationnaires dont les différentes fréquences changent dans le temps.

L'analyse des séries transitoires de différentes durées nécessite l'utilisation d'atomes dont les supports temporels ont des tailles variables. La transformée en ondelettes est l'outil qui permet le mieux de décomposer des signaux par une famille d'ondelettes translatée et dilatée. L'étude des don-

nées économiques grâce aux ondelettes consistent donc à décomposer la série chronologique en composantes associées aux différentes échelles de résolution. La transformée en ondelette permet d'analyser le comportement local d'un signal en réduisant progressivement le paramètre d'échelle  $s$ . Cette procédure de zoom est un outil puissant pour détecter et caractériser les irrégularités d'un signal.

Cette analyse fournit la possibilité de faire des estimations semi-paramétrique des structures très complexes sans connaître la forme fonctionnelle sous-jacente. Contrairement à l'analyse de Fourier, elle donne un aperçu du comportement local alors que l'analyse de Fourier donne un aperçu du comportement global.

La transformée de Fourier de temps d'une série transforme le signal du domaine temporel dans le domaine fréquentiel. Le nouveau signal traité donne un aperçu de la quantité de fréquences et la quantité d'énergie dans chaque fréquence en vigueur dans ce temps-fréquence.

Cependant, les effets locaux ne sont visibles que dans le domaine temporel et non pas dans le domaine fréquentiel. L'analyse par ondelettes permet donc l'utilisation d'une fenêtre, entièrement évolutive, qui est déplacée le long du signal, afin de capturer le comportement local dans le domaine temporel.

Il existe deux types d'ondelettes, l'ondelette père ( father wavelet :  $\phi$  ) et l'ondelette mère ( mother wavelet :  $\psi$  ). La première admet une intégrale unitaire alors que la seconde a une intégrale nulle.

$$\int \phi(\mathbf{t}) dt = \mathbf{1} , \int \psi(\mathbf{t}) dt = \mathbf{0} .$$

L'ondelette père représente les composantes lisses ou de basse fréquence d'un signal alors que l'ondelette mère décrit les composantes de détails ou de

haute fréquence de ce signal. Ces ondelettes sont utilisées en paire au sein d'une famille de fonctions ondelettes.

Les ondelettes pères permettent de capter la tendance et les ondelettes mères captent les déviations par rapport à la tendance. Notons toute fois qu'il existe une grande variété de famille d'ondelettes qui ont été développées ces 10 dernières années ; en particulier les ondelettes orthogonales :

- Haar
- Daubechies
- Symlets
- coiflets

### **Haar :**

L'ondelette de Haar est la plus ancienne et la plus simple de toutes les familles d'ondelettes. Le Haar transformation est réalisée par le calcul des moyennes glissantes et les différences avec les signaux d'échelle.

### **Daubechies:**

Les Daubechies transformations sont définies de la même manière que la transformée de Haar, en calculant des moyennes glissantes et les différences. Toutefois, ces moyennes et les différences sont calculées avec des signaux d'échelle différente et comme le soutien de ces ondelettes est plus grande, ces moyennes et les différences sont calculées en utilisant plus de valeurs du

signal, offrant ainsi une amélioration considérable dans les capacités de ces transformations.

Ces ondelettes sont proposés par Ingrid Daubechies, un nom familier dans la recherche d'ondelettes.

### **Symlets :**

Symlets sont, comme leur nom l'indique, les ondelettes presque symétrique, cette famille a été proposée par Daubechies comme une modification sur les ondelettes de Daubechies. Ces ondelettes support compact ont  $N$  moments nuls et une largeur d'appui de  $2N - 1$ .

### **Coiflets :**

Cette famille d'ondelettes support compact sont conçus dans le but de maintenir une correspondance étroite entre les valeurs de la tendance et les valeurs du signal d'origine. Coiflets sont construits par Daubechies.

La décomposition par ondelettes d'un processus aléatoire donne donc une représentation de sa variabilité sur différentes échelles. Elle permet, entre autres, l'élaboration de coefficients de corrélation multi-échelle dynamique.

Elle analyse donc la série chronologique à différentes bandes de fréquences et à différentes résolutions.

La décomposition d'une série chronologique par ondelettes donne deux types de série:

- Une série d'approximation grossière qui produit des coefficients d'approximation
- Une série d'information détaillée qui produit des coefficients de détails

Afin d'aboutir à cette décomposition, les ondelettes font appel à deux fonctions spécifiques :

- Celles liées aux filtres pass-bas et qui portent le nom de Fonctions d'échelle
- Celles liées aux filtres pass-haut et qui portent le nom de Fonctions d'ondelettes

La transformée en ondelettes permet donc de décomposer un signal en plusieurs bandes de fréquences différentes. Cette décomposition se caractérise par une succession dans le domaine du temps de filtrages pass-bas et pass-haut.

Le filtrage du signal permet d'obtenir à chaque niveau de décomposition la moitié de la résolution de la série dans le domaine du temps, suivie de la moitié de la bande de fréquence.

La décomposition d'un signal par ondelettes permet donc d'obtenir une bonne résolution temporelle au niveau des structures à hautes fréquences, et une bonne résolution fréquentielle au niveau des structures à basses fréquences.

Une ondelette  $\psi \in L^2(\mathbb{R})$  est une fonction de moyenne nulle :

$$\int \psi(t) dt = 0. \quad (2.1)$$

Elle est normalisée à  $\|\psi\| = 1$ , et centrée au voisinage de  $t=0$ . Une famille d'atomes temps-fréquence s'obtient en dilatant l'ondelette  $\psi$  par un facteur  $s$ , et en la translatant par  $\tau$  :

$$\psi_{\tau,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (2.2)$$

Ces atomes restent de norme 1 :  $\|\psi_{u,s}\| = 1$ . Cependant, toute fonction  $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$  peut être représentée par le développement en série d'ondelettes

suisvant:

$$f(t) = \sum_k v_{j,k} \phi_{j,k}(t) + \sum_k \omega_{j,k} \psi_{j,k}(t) + \dots + \sum_k \omega_{j,k} \psi_{j,k}(t) + \dots + \sum_k \omega_{j,k} \psi_{j,k}(t). \quad (2.3)$$

Où les coefficients  $v_{j,k} = \sum_k \phi_{j,k} f(t)$  et  $\omega_{j,k} = \sum_k \psi_{j,k} f(t)$  représentent respectivement les coefficients d'échelles et les coefficients d'ondelettes et où  $\phi_{j,k}$ ,  $\psi_{j,k}$  sont des fonctions d'échelles et d'ondelettes qui respectent les conditions suivantes:

$$\begin{cases} \int \phi_{j,k}(t) \phi_{j,k^*}(t) dt & = \delta_{k,k^*} \\ \int \psi_{j,k}(t) \psi_{j^*,k^*}(t) dt & = \delta_{j,j^*} \delta_{k,k^*} \\ \int \psi_{j,k}(t) \psi_{j,k^*}(t) dt & = 0, \forall j, k \end{cases} \quad (2.4)$$

$\delta_{j,k}$  est le coefficient de Kronecker ( Kronecker delta ). La fonction d'échelle, aussi connu sous le nom de "father wavelet", se presente sous la forme suivante:

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \phi\left(\frac{t - 2^j k}{2^j}\right), \quad (2.5)$$

la fonction d'ondelettes, aussi appelée "mother wavelet" est définie de la manière suivante:

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \psi\left(\frac{t - 2^j k}{2^j}\right), \quad (2.6)$$

L'équation ?? dépend de deux paramètres, l'échelle (ou fréquence) et le temps. L'échelle ou facteur de dilatation  $j$  contrôle la longueur de l'ondelette, pendant que la translation ou paramètre de localisation ou d'emplacement  $k$ , indique la portion non nulle de chaque vecteur de base d'ondelettes.

Pour capter l'information, la fonction de base d'ondelettes est étirée (ou compressée) en fonction du paramètre d'échelle. Pour extraire des informations de fréquence, nous disposons d'une large fenêtre d'information sur les rendements des mouvements de basse fréquences et d'une fenêtre étroite d'information sur les rendements de mouvements à haute fréquences.

Pour plus de précision, notons que la fonction d'échelle intégré à 1 a pour fonction de reconstruire les parties lisses et de basse fréquence d'un signal,

alors que la fonction d'ondelettes intégrée à 0 permet de décrire les parties détaillées et de haute fréquence d'un signal.

Ainsi, en appliquant une analyse décomposée de plusieurs résolutions du niveau  $j$ , on peut obtenir une reconstruction complète du signal partitionné, en une série de  $j$  composantes de fréquences, de sorte que chaque élément correspond à une gamme particulière des fréquences.

La transformée en ondelettes continue d'une série chronologique  $x(t)$  par rapport à une ondelette  $\psi(t)$  à l'échelle  $s$  et à la position  $\tau$  est donnée par la convolution suivante :

$$Wx(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left( \frac{t - \tau}{s} \right) dt \quad (2.7)$$

où  $*$  est l'expression conjuguée de  $\psi(t)$ .

La transformation inverse en ondelettes est alors:

$$x(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{\tau, s}(t) Wx(\tau, s) \frac{d\tau ds}{s^2} \quad (2.8)$$

Elle permet de récupérer la série d'origine,  $x(t)$ , en intégrant toutes les échelles et les positions de temps.

### 2.1.1 L'analyse multi-résolution (MRA)

Pour une série chronologique, échantillon discret journalier d'un processus aléatoire, on a recours à la transformée en ondelettes discrètes (DWT) et en particulier au chevauchement manuel transformé en ondelettes discrètes (MODWT). Elle permet l'analyse multi-résolution (MRA) qui est une propriété de reconstruction de la décomposition des ondelettes.

Pour la chronique  $x_t$ , l'analyse en multi-résolution (MRA) donne la décomposition additive à travers le MODWT :

$$x_t = \sum_{j=1}^J D_{j,t} + A_{J,t} \quad (2.9)$$

Selon l'équation ??, on obtient pour chacune des échelles  $j$  un ensemble de coefficients  $D_j$  constituant le détail de niveau  $j$ , renfermant les composantes du signal de période comprise entre  $2^{j-1}$  et  $2^j$ , chacun avec le même nombre d'observations comme dans le signal d'origine  $x_t$ .

Ces coefficients de détails capturent les fluctuations locales à chaque échelle sur toute la période d'une série chronologique.

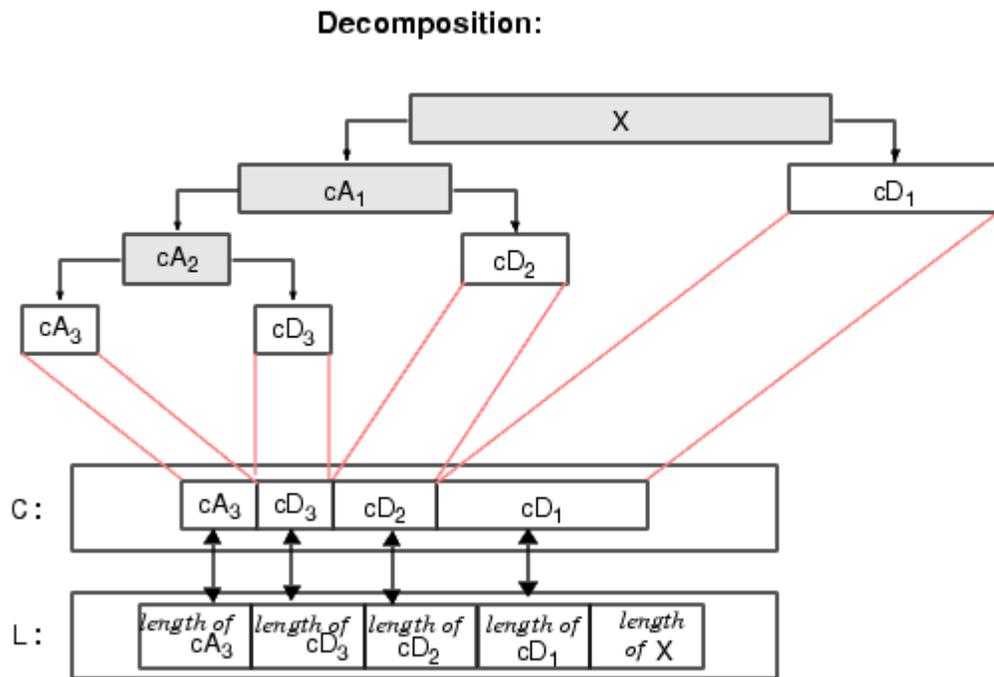
L'ensemble des valeurs approximatives  $A_J$  de la série chronologique fournit une tendance lisse ou globale du signal d'origine.

Lorsqu'on ajoute  $D_j$  à  $A_J$  pour  $j = 1, 2, 3, \dots, J$ , on construit une approximation de plus en plus précise du signal de départ. Cette forme additive de reconstruction nous permet de valider chacune de ces sous-séries  $(D_j, A_J)$  séparément et d'ajouter la validation individuelle pour générer une déduction globale.

La chronique  $x_t$  se décompose ainsi selon la somme de signaux orthogonaux :

$$x_t = A(J) + D(1) + D(2) + \dots + D(J) \quad (2.10)$$

Figure 2.1: Décomposition par ondelettes



Afin de prendre en compte les limites des conditions périodiques de la chronique, nous utilisons pour la décomposition de cette dernière la famille d'ondelettes de Daubechies à huit coefficients non nuls (Daubechies, 1992) tout en recourant à la transformée en ondelettes discrète invariante avec un certain nombre d'échelles ( $j = 1, \dots, 7$ ).

La table ?? "traduit" les échelles d'ondelettes dans des horizons de temps appropriés. Elle donne ainsi un aperçu de la relation entre les niveaux MODWT et les échelles de temps pour les séries temporelles. Chaque échelle correspond à un intervalle de fréquence et elle est associée à une gamme de

différentes longueurs qui s'étendent de quelques jours à plusieurs années <sup>2</sup>

Table 2.1: Analyse multirésolution sur différents niveaux d'échelles

Horizons de temps	
Echelles d'ondelettes	Jours fréquentiels
$D_1$	2-4 jours
$D_2$	4-8 jours
$D_3$	8-16 jours
$D_4$	16-32 jours
$D_5$	32-64 jours
$D_6$	64-128 jours
$D_7$	128-256 jours
$A_7$	>256 jours

L'utilisation d'une décomposition par ondelettes, va permettre la mise en place des coefficients de corrélation multi-échelle, une représentation de la variabilité échelle par échelle de certains processus stochastiques, une manipulation directe des coefficients d'ondelettes, pour obtenir des quantités statistiques reconnaissables telle que les variances, les covariances, et les corrélations d'ondelettes.

### La variance d'ondelettes

La variance d'ondelettes permet la décomposition de la variance d'une série chronologique, en composantes associées à différentes échelles (Percival,

---

<sup>2</sup>Les résultats ont été obtenus à l'aide du logiciel R 2.15.3 et du package Waveslim écrit par Whitcher (2012) (<http://cran.r-project.org/web/packages/waveslim/index.html>)

1995) où la variance d'ondelettes à l'échelle  $j$ ,  $\sigma_x^2(\lambda_j)$ , d'un processus stochastique non stationnaire  $\{x\}$  avec une variance  $\sigma_x^2$  est donnée par la variance du coefficient d'ondelettes du niveau  $j$ :

$$\sigma_x^2(\lambda_j) = Var(\omega_{j,t}^x). \quad (2.11)$$

L'écart en ondelettes pour un signal  $f(t)$  est défini comme la variance des coefficients d'ondelettes à l'échelle  $2^{j-1}$  et un estimateur sans biais, en utilisant le modèle du maximum de chevauchement discret en transformée d'ondelettes (MODWT), après avoir enlevé tous les coefficients affectés par les conditions aux limites périodiques. La variance d'ondelettes est défini par l'équation suivante:

$$v_f(2^{j-1}) = \frac{1}{N_j} \sum_{t=L_{j-1}} w_{j,t} \quad (2.12)$$

où  $N_j = (N/(2^j - L_j))$  avec  $L_j = [(L - 2)(1 - 2^j)]$  étant la longueur de l'échelle  $2^j$  d'ondelettes, le vecteur  $w$  est un groupe de vecteurs à n-dimensions contenant les coefficients  $v_J, w_J, \dots, w_1$  des approximations des séries d'ondelettes. La variance d'ondelettes du niveau  $j$  est tout simplement la variance des coefficients d'ondelettes de ce niveau (Gençay et al.,2002).

L'une des particularités importante de la décomposition de la variance par la transformée en ondelettes est le principe de la conservation de l'énergie. En effet, Gençay et al ( 2002 ) ont montré en fait que grâce à la somme des carrés des coefficients d'ondelettes et des coefficients d'échelle , on peut trouver un estimateur sans biais de la variance de l'ondelette basé sur la transformée en ondelettes discrète.

## La covariance d'ondelettes

La covariance d'ondelettes entre deux variables  $x$  et  $y$  aux échelles d'ondelettes  $j$  peut être défini comme une covariance à l'échelle  $j$  entre des coefficients d'ondelettes de  $x$  et  $y$ , qui se présente de la manière suivante:  $\gamma_{xy}(\lambda_j) = Cov(\omega_{j,t}^x \omega_{j,t}^y)$ .

Après avoir enlevé tous les coefficients d'ondelettes touchés par les conditions aux limites, un estimateur sans biais de la covariance d'ondelettes en utilisant le MODWT peut être donné par:

$$Cov_{x(t)y(t)}(2^{j-1}) = \frac{1}{N_j} \sum_{t=L_{j-1}} w_{j,t}^{x(t)} w_{j,t}^{y(t)} \quad (2.13)$$

### La corrélation d'ondelettes

La corrélation d'ondelettes entre deux séries chronologiques  $\rho_{xy}(\lambda_j)$  qui se définissent comme le rapport de l'ondelette de covariance  $\gamma_{xy}(\lambda_j)$  et la racine carrée de leurs ondelettes de variances  $\sigma_x(\lambda_j)$  et  $\sigma_y(\lambda_j)$  ( voir, (whitcher et al.1999.) et (whitcher et al.2000.)). Etant donné les estimateurs sans biais de la racine carrée de l'ondelette de variance, l'estimateur sans biais de l'ondelette de corrélation de l'échelle  $j$ , peut être obtenu par:

$$\widetilde{\rho_{xy}(\lambda_j)} = \frac{\widetilde{\gamma_{xy}(\lambda_j)}}{\sigma_x(\lambda_j)\sigma_y(\lambda_j)} \quad (2.14)$$

A partir de l'estimateur sans biais de l'ondelette de corrélation pour l'échelle  $j$ ,  $\widetilde{\rho_{xy}(\lambda_j)}$ , et en s'appuyant sur le spectre  $S\omega_x(\lambda_j)$  des coefficients d'ondelettes de l'échelle  $j$ , il est possible de déterminer la variance asymptotique  $V_j$  de l'estimateur de l'ondelettes de variance ou de covariance et de construire par la suite un intervalle aléatoire qui constitue 100(1-2p)% d'intervalle de confiance.

## 2.1.2 La Cohérence en ondelette

Le spectre de puissance d'ondelettes se définit comme:  $|W_x(\tau, s)|^2$  (avec  $\tau$ : position, et  $s$ : échelle). Il mesure la contribution relative à chaque instant et à chaque échelle de la variance de la série chronologique. En fait, le spectre de puissance d'ondelettes peut être intégré soit dans  $\tau$ , soit dans  $s$  pour récupérer ensuite la variance totale de la série :

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |W_x(\tau, s)|^2 \frac{d\tau ds}{s^2} \quad (2.15)$$

Le spectre croisé d'ondelettes capte la covariance entre deux séries  $x_t$  et  $y_t$ , dont les transformées d'ondelettes respectives sont:  $W_x(\tau, s)$  et  $W_y(\tau, s)$ . Le spectre croisé d'ondelettes s'écrit:

$$W_{xy}(\tau, s) = W_x(\tau, s)W_y^*(\tau, s) \quad (2.16)$$

où  $W_x(\tau, s)$  et  $W_y(\tau, s)$  sont respectivement les transformées en ondelettes des séries  $x_t$  et  $y_t$  avec  $\tau$  le paramètre de position, et  $s$  celui de l'échelle.

L'ondelette mère étant une fonction complexe, le spectre d'ondelettes croisé est également à valeur complexe. Il peut être décomposé en parties réelles et imaginaires<sup>3</sup>. La cohérence d'ondelettes  $\Psi_{xy}(\tau, s)$  est alors:

$$\Psi_{xy}(\tau, s) = \frac{\mathcal{R}(W_{x,y}(\tau, s))}{|W_x(\tau, s)||W_y(\tau, s)|} \quad (2.17)$$

où  $\mathcal{R}$  désigne la partie réelle du spectre croisé d'ondelettes qui mesure la covariance. La mesure basée sur la cohérence en ondelette  $\Psi_{xy}(\tau, s)$  permet de quantifier la co-évolution dans l'espace temps-fréquence et d'évaluer la co-évolution sur lesquelles des périodes de temps et des fréquences sont les plus élevées. Il joue un rôle fondamental en tant que coefficient de corrélation contemporain autour de chaque instant de temps et pour chaque fréquence. Ce

---

<sup>3</sup>Croux, Forni et Reichlin (2001)

coefficient de corrélation dynamique,  $\Psi_{xy}(\tau, s)$ , est compris entre -1 et 1. La mesure de cette corrélation dynamique retenue peut être considérée comme une généralisation des informations au niveau du temps et de fréquence dans le sens où  $\Psi_{xy}(\tau, s)$  fournit des informations sur la covariation non seulement au niveau des fréquences, mais aussi du temps. On peut alors identifier les régions dans l'espace temps-fréquence où les deux séries chronologiques évoluent ensemble à la fois dans le temps et dans l'espace des fréquences.

## 2.2 Analyse bivariée de la relation entre le prix du quota et du crédit carbone

La relation entre le Système Communautaire d'Echange de Quotas d'Emission (SCEQE) et le Mécanisme de Développement Propre (MDP) intéresse aujourd'hui de nombreux pays du monde. Le MDP est considéré comme l'un des principaux outils qui permet aux pays d'augmenter leur rentabilité et de s'acquitter de leurs obligations de conformité issues du protocole de Kyoto. Il est considéré, de plus, comme un moyen rentable pour répondre au changement climatique. L'existence d'une relation entre le SCEQE et le MDP peut conduire à une baisse du prix du quota carbone européen et également à une réduction des coûts de conformités.

Pour mesurer la nature de cette relation, nous analysons les différentes interactions qui peuvent exister entre le marché Européen de quota carbone (*EUA* : European Union Allowance) et celui du crédit carbone (*CER*: Certified Emission Reduction). Notre objectif est de formuler une aide aux différents intervenants des marchés leur permettant d'anticiper le comportement des prix *EUA* et *CER*, dans le but de minimiser le risque des pertes lors des achats ou des ventes des quotas ou des crédits carbonés. L'analyse de la relation entre l'*EUA* et le *CER*, est réalisée dans le domaine temps-fréquence (ondelettes), qui prend en compte le changement d'état de la cor-

rélation entre les deux prix, pour chaque fréquence au cours du temps, et, qui de ce fait, met en évidence l'hétérogénéité du comportement des différents agents. L'analyse multirésolution par ondelettes permet de capturer la structure de dépendance des deux séries de prix, et de montrer l'existence de la dynamique complexe sur différentes échelles de temps. L'étude insiste sur la direction de la relation de causalité au sens de granger des séries brutes et des différentes composantes d'ondelettes sur les bandes de fréquences associées (haute, moyenne et basse).

Sur la période du 24 Mars 2008 au 19 Octobre 2012, la causalité entre l'EUA et le CER est différente selon ces fréquences révélant une instabilité de la relation sur la période. A court terme elle est uni-directionnelle, contrairement à moyen et long terme où elle est bi-directionnelle. Sur ce constat, nous sélectionnons un modèle vecteur autorégressif pour étudier pour chacun des horizons choisis (court et moyen) les interrelations entre les variables. Nos calculs confirment l'hypothèse d'hétérogénéité des agents du marché carbone qui s'opposent aux résultats obtenus globalement sur la même période. Il est donc possible pour les agents qui interviennent sur ces marchés de prendre en compte ces résultats en fonction de leurs horizons d'investissement.

### **2.2.1 Cadre juridique sur la relation entre le prix du Quota et du Crédit carbone**

La Commission Européenne a décidé de mettre une relation entre le SCEQE et le MDP le 23 juillet 2003 afin de faciliter la convertibilité de l'URE et du CER en EUA pour être utilisé sur le marché européen de carbone qu'à partir du 1er Janvier 2008<sup>4</sup>.

Cette relation avait pour but de réduire des coûts de conformité pour des entreprises qui sont couverts par le SCEQE en faisant intervenir des crédits

---

<sup>4</sup>EU,2004

issus des autres pays de l'Annexe-B ainsi que ceux qui sont hors de cette zone.

La relation entre le SCEQE et le MDP peut entraîner une augmentation du niveau d'investissement dans les nouvelles technologies dans des pays en voie de développement en créant un grand marché internationale dont le but sera de lutter conjointement aux émissions de GES.

Cependant, certains auteurs ont fustigé la mise en place de cette relation. En effet, certains économistes stipulent que la mise en place des mécanismes de flexibilité peuvent pousser certains industriels et même des Etats de l'Annexe-B à baisser le niveau de financement des nouvelles technologies non-polluante afin de payer moins cher les crédits carbone. Une entrée massive des crédits carbone sur le marché carbone européen va entraîner une baisse du prix du quota carbone (EUA) (Iefèvre, 2005).

Il ya aussi les travaux réalisés par Sépibus (2008) qui met en doute l'intégrité environnementale des crédits carbone issus de ces projets.

Compte tenu de tous ces doutes, la Commission Européenne a procédé en tenant compte des principes de complémentarité et les obligations d'additionnalité qui ont été retenus lors des Accords de Marrakech de faire adopter la direction de la relation entre le SCEQE et le MDP que le 27 Octobre 2004 afin d'empêcher aux Etats membres et aux industriels couverts par le SCEQE de recourir à une utilisation abusive des crédits carbone. Il y a donc un plafond que les Etats doivent imposer sur toutes les installations afin de respecter le critère 12 de l'annexe III retenu dans les directives du SCEQE.

Le cadre juridique Européen sur l'importation et l'utilisation des CER à l'intérieur du SCEQE pour la phases 2 est présenté ci-dessous:

## **Phase 2: Principe sur l'importation et l'utilisation des CER <sup>5</sup>**

---

<sup>5</sup>commission européenne, 2006

En novembre 2006, la Commission Européenne a présenté sa troisième directive concernant le critère 12 de l'anne III de la directive du SCEQE sur l'utilisation des crédits fondés sur des projets dans la phase 2 (2008-2012) du marché carbone.

Dans le guide proposé, la Commission Européenne a présenté une formule pour calculer le montant total des crédits que les Etats et les industriels couverts par le SCEQE doivent prendre en compte afin de fixer la limite du niveau de crédits à utiliser.

La Commission Européenne a précisé que le montant maximum de crédits basés sur des projets que les Etats membres sont autorisés à utiliser dépend de l'effort de réduction qu'ils sont disposés à faire pour atteindre leurs objectifs de kyoto de l'UE.

L'effort de réduction peut être calculé sur la base de trois ligne de base différentes, 1990, 2004, et 2010. Selon cette déclaration, le montant maximum d'URCE et d'ERU qu'un Etat membre est autorisé à importer doit être égale à la moitié de la plus grande différence entre les niveaux des émissions de GES dans l'une de ces années et la cible de réduction prévue dans l'accord de partage de la charge et du protocole de kyoto. Par conséquent un plafond effectif de 50% du nombre de crédits pour être utilisé par un Etat membre à l'égard de son effort de réduction est fixé par la commission Européenne.

En ce qui concerne la distribution des parts du protocole de kyoto entre les installations couvertes par le SCEQE et les secteurs non couverts de l'UE, il est de la responsabilité des Etats membres de choisir les secteurs qui doivent supporter le fardeau des efforts de réduction domestique. Si les crédits fondés sur des projets d'achat des Etats membres qu'ils sont tenus de déduire le montant des crédits MOC-MDP du plafond global. Ce qui signifie que le montant réel des crédits fondés sur des projets qui peuvent être utilisés par des installations couvertes par cet Etat membre devrait être réduit du mon-

tant des achats du gouvernement. Toutefois, si elles ne peuvent pas acheter des crédits avec des fonds publics, le montant total de crédits peut être réparti entre les installations couvertes par le SCEQE.

Les Etats membres doivent déterminer le montant maximal des crédits que les opérateurs couverts par le SCEQE sont autorisés à utiliser comme un pourcentage de l'allocation de quotas à chaque installation. En outre, la limite imposée à l'utilisation des crédits fondés sur des projets par les opérateurs ne peut pas être inférieure à 10% des quotas alloués à chaque installation<sup>6</sup>. La raison est d'inciter les opérateurs à investir dans des projets dans les pays en développement en assurant un équilibre raisonnable entre les réductions des mesures nationales et des mesures de réduction à l'étranger.

Les nouveaux Etats membres de l'Union Européenne et leurs opérateurs qui n'ont pas de fossé à combler pour répondre à leurs obligations de conformité en vertu du protocole de Kyoto en raison de leurs économies de ventilation dans les années 1990 ne sont pas autorisés à utiliser les unités issues des mécanismes de Kyoto pour compenser leurs obligations.

Au cours de la phase 2 (2008-2012), la limite globale sur l'utilisation des crédits issus des MOC et MDP au sein du SCEQE équivaut à 13.4% du plafond global ce qui signifie que la demande maximale pour les crédits des mécanismes de Kyoto serait de 278.3 Mt CO<sub>2</sub>e par an (Banque Mondiale, 2008). En d'autres termes, l'utilisation maximale autorisée du CER et de l'ERU durant la phase 2 est de 1400 Mt CO<sub>2</sub>e.

---

<sup>6</sup>UE,2008

### 2.2.1.1 Les données et leurs statistiques Descriptives

Les échanges des quotas carbonés Européens s’effectuent sur plusieurs différents marchés, celui des spots, des futures et enfin le marché de gré-à-gré. Tous ces marchés donnent des prix qui fluctuent différemment. Les informations concernant les prix ne sont disponibles que sur les places des grands cabinets qui jouent le rôle de consultant auprès de grandes entreprises polluantes Européennes. Les données liés sont donc confidentielles et payantes. Nous utilisons les données journalières (prix en euro/tonne) de la Phase II (2008-2012) issues de l’ECX<sup>7</sup> qui est le marché Européen le plus liquide, sur la période du 24 Mars 2008 au 19 Octobre 2012 soit 1195 observations (Voir Figure ?? ). Les données des prix EUA et CER ont été construites en roulant sur des contrats à terme qui ont été négocié sur des dates d’échéance.



Figure 2.2: Prix future du quota du Carbone (EUA) et du crédit Carbone (CER)

Les Table ?? et ?? présentent respectivement les statistiques descriptives des prix EUA et CER et leur coefficient de corrélation linéaire.

---

<sup>7</sup>European Climate Exchange

Table 2.2: Statistiques descriptives des prix Hebdomadaires

	EUA	CER
Moyenne	14.1278	11.02642
Median	14.1300	11.8600
Maximum	29.3300	22.9400
Minimum	6.2100	1.0600
Std.Dev	5.0678	4.7026
Skewness	0.7832	-0.13432
Kurtosis	3.4652	2.7679
Jarque-Bera	132.9571	6.2757
Probabilité©	0.000000	0.0433
Somme	16882.78	13176.57
Sum Sq.Dev	30665.67	26405.14
Observations	1195	1195

Coefficient de corrélation linéaire		
	EUA	CER
EUA	1.000000	0.9431
CER	0.9431	1.000000

Table 2.3: Corrélation inconditionnelle entre EUA et le CER

Le coefficient d'asymétrie des distributions du prix du quota carbone est positif ce qui indique que les hausses de prix EUA sur le marché carbone sont plus probables que les baisses alors que le coefficient d'asymétrie associé aux prix du crédit carbone présente une valeur négative. Il y a plus de baisses sur le marché de crédit que de hausses. La distribution du prix du quota carbone présente une valeur du kurtosis supérieure à 3 (3.4652) (leptokurticité) alors que celle du crédit carbone est inférieure (2.76) (m sokurticit ).

La statistique de Jarque-Bera rejette l'hypothèse de normalité des distributions de ces prix et présente de ce fait des similitudes avec des données financières.

La figure ?? montre par ailleurs des évolutions concomitantes des deux prix révélées par leur coefficient de corrélation linéaire positif et significatif (**0.9431**).

### **2.2.1.2 Analyse de la co-intégration entre l'EUA et le CER**

L'étude de la co-intégration entre l'EUA et le CER a pour but de préciser à la fois la relation de long terme et de court terme entre les deux prix (Engle et Granger 1987).

Cependant, un test de racine unitaire sur les séries de prix doit préalablement s'effectuer. La présence d'une racine unitaire dans nos prix carbonés aura des conséquences très importantes sur le plan statistique:

- Les propriétés asymptotiques générales des estimateurs (vitesse de convergence, normalité asymptotique) ne tiennent plus. Il faut alors avoir recours à une théorie asymptotique spéciale.
- La présence de régresseurs comportant une racine unitaire dans une régression peut conduire à estimer des régressions apparemment très bonnes entre des variables qui sont totalement indépendantes entre elles. C'est le problème des régressions factices.
- Une série trend stationnaire (TS) et une série stationnaire en différence se comportant de manière radicalement opposée dans le long terme. Une série trend stationnaire a tendance à se repositionner autour de son trend déterministe après un choc aléatoire. C'est ce que l'on appelle la propriété de mean reversion. Il y a aussi une série stationnaire

en différence (DS) qui ne revient pas autour de sa tendance après un choc, puisque le choc affecte aussi la tendance stochastique de la série.

Les deux séries sont intégrées d'ordre 1 comme le révèle le test de Dickey-Fuller retranscrit ci-dessous à titre d'exemple<sup>8</sup>.

Table 2.4: Test de Dickey-Fuller

	T-Statistique	Valeur Critique
EUA	-1.8517	-3.4135
$\Delta EUA$	<b>-25.5041</b>	-3.4135
CER	-1.7150	-3.4135
$\Delta CER$	<b>-33.1418</b>	-3.4135

Les résidus de la relation entre EUA et CER (tables ??, ??) sont intégrés d'ordre 1 rejetant l'hypothèse de cointégration qui peut être confirmée en utilisant l'apport de Johansen (91;95) ( confère le test de la trace ; tables ?? et ?? en annexe).

---

<sup>8</sup>On peut aussi vérifier l'existence de ces racines unitaires avec d'autres tests standards ( PP, KPSS, ERS, Ng-Perron...))

Table 2.5: Estimation de la relation statique entre EUA et le CER

Variable dépendante : EUA				
Variables	Coefficient	Ecart-type	T-Statistique	Prob
CER	1.0164	0.0103	98.0479	0.0000
C	2.9201	0.1242	23.5004	0.0000
Coefficient de détermination	0.8896			
F-statistique	9613.404			
Prob(F-statistique)	0.0000			

Table 2.6: Test de Dickey-Fuller sur les résidus de la regression

	T-Statistique	Valeur Critique
Résidus	<b>-2.0502</b>	-3.4135

Ce résultat ne confirme pas l'étude de chevalier (2010). Il est peut être dû au fait que ce dernier avait utilisé des données plus courtes, allant d'une période du 9 mars 2007 au 14 janvier 2010, alors que notre analyse s'intéresse à toute la seconde phase du marché carbone.

On peut en effet observer sur la figure ?? une divergence entre les 2 prix qui s'accroît en 2011 et 2012.

### 2.2.1.3 Analyse de la relation de causalité entre l'EUA et CER

L'absence de cointégration entre nos deux séries nous amène à analyser la relation de causalité entre le EUA et le CER en faisant intervenir l'approche développée en 1969 par Granger. Il existe une causalité uni-directionnelle entre le EUA et le CER (Table ??). En effet le prix du crédit carbone lié au MDP cause au sens de Granger celui du quota carbone (probabilité = 1.E-38

$< 0.05$ ).

L'uni-directionnalité de notre causalité peut aussi s'expliquer par deux phénomènes; la fin de la seconde phase (2008-2012) du marché carbone et la mise en place de nouvelles règles de fonctionnement de ce dernier.

Tests de causalité	Causalité de Granger	
Hypothèse	$\Delta EUA$ ne cause pas $\Delta CER$	$\Delta CER$ ne cause pas $\Delta EUA$
Probabilités	0.4089	<b>1.E-38</b>

Table 2.7: Tests de causalité de Granger (P-values) sur les séries de rendement

#### 2.2.1.4 Modélisation vecteur Autorégressif entre l'EUA et le CER

Pour compléter l'étude de la relation entre les deux marchés carbonés, nous recourons à une modélisation Vecteur Autoregressive (VAR) qui repose sur l'hypothèse selon laquelle l'évolution de l'économie est bien approchée par la description du comportement dynamique d'un vecteur à N variables dépendant linéairement du passé.

Dans ce type de modèle les variables sont stationnarisées en calculant leurs rendements.

La sélection du nombre de retard à partir des critères SC<sup>9</sup> (Schwarz information criterion) et le critère HQ<sup>10</sup> (Hannan-Quinn information criterion), a permis la sélection d'un VAR(1) (Figure ??)

<sup>9</sup>Le SC est un critère d'information dérivé du critère d'information d'Akaike proposée par Gideon Schwarz (1978). À la différence du critère d'information d'Akaike, la pénalité dépend de la taille de l'échantillon et pas seulement du nombre de paramètres.

<sup>10</sup>Hannan et Quinn (1979) proposent un critère (HQ) pour les processus ARMA qui peut être considéré comme un intermédiaire entre le AIC et le BIC. Il adoucit quelque peu la sévérité de la fonction de pénalité du BIC relativement à la croissance de la taille de l'échantillon tout en maintenant une forte convergence dans l'identification de l'ordre réel du modèle.

Figure 2.3: Détermination du nombre de retard P du modèle VAR(p)

Lag	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
0	5533.540	NA	3.05e-07	-9.328061	-9.319498	-9.324834
1	5552.068	36.96183	2.97e-07	-9.352560	-9.326869*	-9.342877*
2	5554.690	5.220552	2.98e-07	-9.350235	-9.307416	-9.334096
3	5562.234	15.00023	2.96e-07	-9.356213	-9.296266	-9.333618
4	5567.201	9.857631	2.96e-07*	-9.357843*	-9.280768	-9.328793
5	5568.672	2.916188	2.97e-07	-9.353579	-9.259377	-9.318073
6	5571.818	6.222814	2.97e-07	-9.352139	-9.240809	-9.310178
7	5577.896	12.00257*	2.96e-07	-9.355643	-9.227186	-9.307226
8	5581.678	7.454647	2.97e-07	-9.355275	-9.209690	-9.300402

\* indicates lag order selected by the criterion

LR: sequential modified LR test statistic (each test at 5% level)

FPE: Final prediction error

AIC: Akaike information criterion

SC: Schwarz information criterion

HQ: Hannan-Quinn information criterion

Les résultats de son estimation sont présentés dans la table ??

Table 2.8: Estimation du modèle VAR(1)

	$\Delta EUA$	$\Delta CER$
$\Delta EUA(-1)$	-0.137353 (0.04288) [-3.20348]	-0.199336 (0.04974) [-4.00732]
$\Delta CER(-1)$	0.203307 (0.03709) [5.48170]	0.212574 (0.04303) [4.94037]
Constante	-0.000534 (0.00077) [-0.69600]	-0.001985 (0.00089) [-2.23066]

Les rendements du prix du quota carbone dependent négativement de ces propres valeurs passées et des rendements du prix du crédit carbone retardés

d'une période alors que les rendements du prix du crédit carbone dépendent quant à eux positivement de leurs valeurs passées d'une période et des rendements du prix quota carbone retardée d'une période.

Afin de préciser l'impact de ces variables entre elles nous recourons aux fonctions de réponse impulsionnelle. Elles représentent l'effet d'un choc d'une innovation sur les valeurs courantes et futures des variables endogènes. L'idée générale de l'analyse des chocs (ou fonction de réponse aux innovations) est de résumer l'information concernant l'évolution d'une composante suite à une impulsion sur une autre composante à la date  $t=0$ .

Elles nous informent sur les évolutions directionnelles des variables d'une part, et sur l'ampleur de ces déviations d'autre part.

Figure 2.4: Réponse de  $\Delta CER$  à l'impulsion de l'écart-type sur  $\Delta EUA$

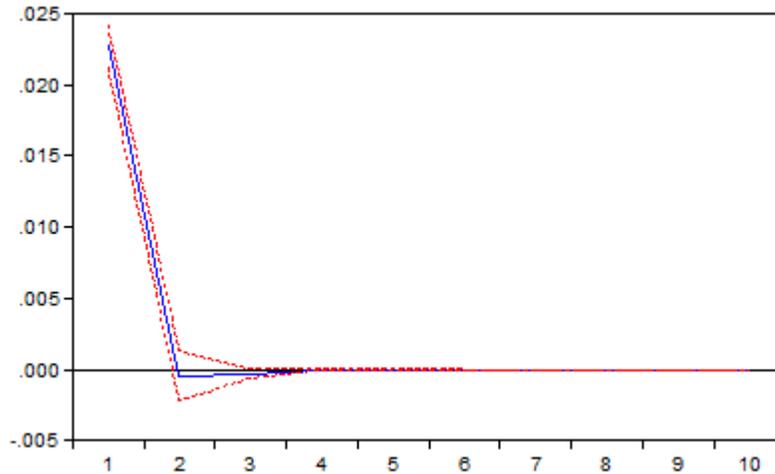
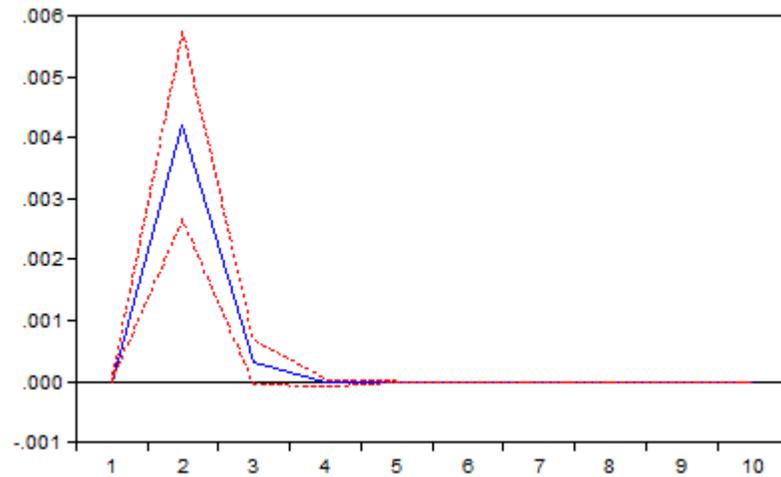


Figure 2.5: Réponse de  $\Delta EUA$  à l'impulsion de l'écart-type sur  $\Delta CER$



Nous observons (figure ??) que le choc sur le prix EUA se répercute immédiatement sur celui du CER et se stabilise à zéro dès la 3<sup>ème</sup> période. Alors que celui sur le CER (figure ??) n'a pas une influence instantanée sur le prix EUA. De ce fait la courbe relative au prix de l'EUA a pour origine le premier jour, et se répercute immédiatement sur celui du CER pour se stabiliser à zéro dès la 4<sup>ème</sup> période.

En définitive il existe une relation de causalité uni-directionnelle globale et stable entre le prix EUA du marché du quota et le CER issus du marché du crédit carbone. La relation entre le marché du crédit et celui du quota carbone est instantannée lorsque c'est le marché du quota qui est impacté alors qu'elle n'est pas immédiate dans le cas d'un choc sur le marché du crédit.

## 2.3 Analyse multi-échelle de la relation entre le prix du quota et du crédit carbone

L'étude que nous venons d'effectuer considère une homogénéité comportementale des agents sur le marché carbone. Pour confirmer, ou infirmer cette hypothèse nous recourons à la décomposition par ondelettes afin de prendre en compte des distinctions comportementales entre les agents.

Nous utilisons la transformée en ondelettes discrètes (DWT), en particulier le chevauchement manuel transformé en ondelettes discrètes (MODWT), pour l'analyse multi-résolution (MRA) qui est une propriété de reconstruction de la décomposition des ondelettes.

Considérons une chronique  $X_t$  avec une taille arbitraire de l'échantillon  $N$ , le  $j^{\text{ième}}$  niveau d'ondelettes ( $\tilde{W}_j$ ) mis à l'échelle ( $\tilde{V}_j$ ) est défini comme:

$$\tilde{W}_{j,t} = \sum_{l=0}^{L_1-1} \tilde{h}_{j,l} x_{t-l} \quad (2.18)$$

$$\tilde{V}_{j,t} = \sum_{l=0}^{L_1-1} \tilde{g}_{j,l} x_{t-l} \quad (2.19)$$

avec  $j = 1, 2, 3 \dots J$ ;  $t = 1, 2, 3 \dots$

où  $\tilde{h}_{j,l} = \frac{h_{j,t}}{2^{\frac{j}{2}}}$  sont les filtres d'ondelettes issues du MODWT, et  $\tilde{g}_{j,l} = \frac{g_{j,t}}{2^{\frac{j}{2}}}$  les filtres d'échelles ( $L_j = [(L-2)(1-2^j)]$  étant la longueur de l'échelle  $2^j$  d'ondelettes; avec  $l = 0, 1, \dots, L_j - 1$ )

Pour la chronique  $X_t$ , la MRA donne une décomposition additive à travers le MODWT qui s'écrit :

$$X_t = \sum_{j=1}^J \tilde{D}_{j,t} + \tilde{A}_{J,t} \quad (2.20)$$

Où  $\widetilde{D}_{j,t} = \sum_{l=0}^{N-l} \widetilde{h}_{j,l} \widetilde{W}_{j,t+l}$  et  $\widetilde{A}_{j,t} = \sum_{l=0}^{N-l} \widetilde{g}_{j,l} \widetilde{V}_{j,t+l}$

Selon l'équation (3), à une échelle  $j$  on obtient un ensemble de coefficient  $D_j$ , chacun avec le même nombre d'observations comme dans le signal d'origine  $x_{t-l}$ . Ces coefficients détaillés capturent les fluctuations locales à chaque échelle sur toute la période d'une série chronologique. L'ensemble des valeurs  $A_j$  fournit une tendance lisse ou globale du signal original. Lorsqu'on ajoute  $D_j$  à  $A_j$  pour  $j = 1, 2, 3, \dots, J$ , on construit une approximation de plus en plus précise du signal original. Cette forme additive de reconstruction nous permet de valider chacune de ces sous-séries  $(D_j, A_j)$  séparément et d'ajouter la validation individuelle pour générer une déduction globale.

La chronique  $X_t$  se décompose alors en la somme des signaux orthogonaux suivants:

$$X_t = A(j) + D(1) + D(2) + \dots + D(j) \quad (2.21)$$

Où  $j$  est un entier positif convenablement choisi vis-à-vis des objectifs de description,  $S(j)$  est la tendance de niveau  $j$ , renfermant les composantes de  $S$  de période supérieure à  $2^j$  jours.  $D(k)$  est le détail de niveau  $k$ , renfermant les composantes du signal de période comprise entre  $2^{k-1}$  et  $2^k$  jours.

Les analyses locales vont s'effectuer en choisissant  $j = 10$  ( car  $2^{10} = 1024 < 1195$ ) de façon à étudier les composantes du signal de la période inférieure à 1195 jours. Nous utilisons le filtre de Daubechies à huit coefficients non nuls qui prend en compte les limites des conditions périodiques (Daubechies, 1992) tout en recourant à la transformée en ondelettes discrète invariante avec un certain nombre d'échelles ( $j = 10$ ) et les différents coefficients issus du filtre d'ondelettes.

Le tableau ?? décrit les échelles d'ondelettes dans des horizons de temps appropriés, fournissant ainsi un aperçu de la relation entre les bandes de

fréquences et les échelles de temps pour les séries chronologiques.

Horizons de temps	
Echelles d'ondelettes	Jours fréquentiels
$D_1$	1-2 jours
$D_2$	2-4 jours
$D_3$	4-8 jours
$D_4$	8-16 jours
$D_5$	16-32 jours
$D_6$	32-64 jours
$D_7$	64-128 jours
$D_8$	128-256 jours
$D_9$	256-512 jours
$D_{10}$	512-1024 jours
$A_{10}$	>1024 jours

Table 2.9: Analyse multirésolution sur différents niveaux d'échelles

Nous utilisons cette analyse multi-échelle pour rechercher à l'aide du test de Dickey-Fuller (table ??) celles qui possèdent ou non des racines unitaires.

Test de Dickey-Fuller	EUA		CER	
Bandes de fréquence	T-Statistique	Valeur Critique	T-Statistique	Valeur Critique
$D_1$	<b>-21.239</b>	-3.413	<b>-21.743</b>	-3.413
$D_2$	<b>-16.795</b>	-3.413	<b>-17.196</b>	-3.413
$D_3$	<b>-15.283</b>	-3.413	<b>-14.961</b>	-3.413
$D_4$	<b>-10.961</b>	-3.413	<b>-11.215</b>	-3.413
$D_5$	<b>-9.849</b>	-3.413	<b>-9.687</b>	-3.413
$D_6$	<b>-5.877</b>	-3.413	<b>-5.549</b>	-3.413
$D_7$	<b>-4.462</b>	-3.413	<b>-4.541</b>	-3.413
$D_8$	<b>-3.520</b>	-3.413	<b>-3.629</b>	-3.413
$D_9$	-3.014	-3.413	-2.989	-3.413
$D_{10}$	0.263	-3.413	-2.401	-3.413
$A_{10}$ (>1024)	-2.55	-3.413	-2.110	-3.413

Table 2.10: Test de Dickey-Fuller sur les bandes de fréquences

Nous regroupons alors les bandes de fréquences de la façon suivante:

- le 1<sup>er</sup> groupe concerne les bandes de haute fréquence (stationnaire)
- le 2<sup>ème</sup> les bandes de moyenne fréquence (stationnaire)
- le 3<sup>ème</sup> les bandes de basse fréquence (non-stationnaire)

Avec les deux premiers groupes, il est possible d'élaborer des modèles de type VAR alors que pour le troisième, il faut recourir à un modèle de cointégration.

Les résultats consignés dans le tableau ?? permettent d'unifier des différentes bandes de fréquence (haute, moyenne et basse). La bande à haute fréquence (figure ??) est la somme des bandes  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $D_4$  (1 à 16 jours) et correspond au comportement des agents à court terme, celle à moyenne fréquence (figure ??) est la somme des bandes  $D_5$ ,  $D_6$ ,  $D_7$ ,  $D_8$  (16 à 256

jours) qui correspond au comportement des agent à moyen terme, enfin la structure à basse fréquence (figure ??) est la somme des bandes  $D_9$ ,  $D_{10}$ ,  $A_{10}$  (256 à 1195 jours) qui correspond aux agents ayant le comportement de long terme sur les marchés carbonés.

Le test de Dickey-Fuller réitéré sur les différents regroupements (table ??) confirme le bien fondé de la procédure retenue:

Test de Dickey-Fuller	EUA		CER	
	T-Statistique	Valeur Critique	T-Statistique	Valeur Critique
Haute fréquence	<b>-14.89249</b>	-1.941	<b>-15.26189</b>	-1.941
Moyenne fréquence	<b>-2.800</b>	-1.941	<b>-3.246</b>	-1.941
Basse fréquence	-1.828	<b>-1.941</b>	-1.848	<b>-1.941</b>

Table 2.11: Test de Dickey-Fuller sur les bandes de fréquences

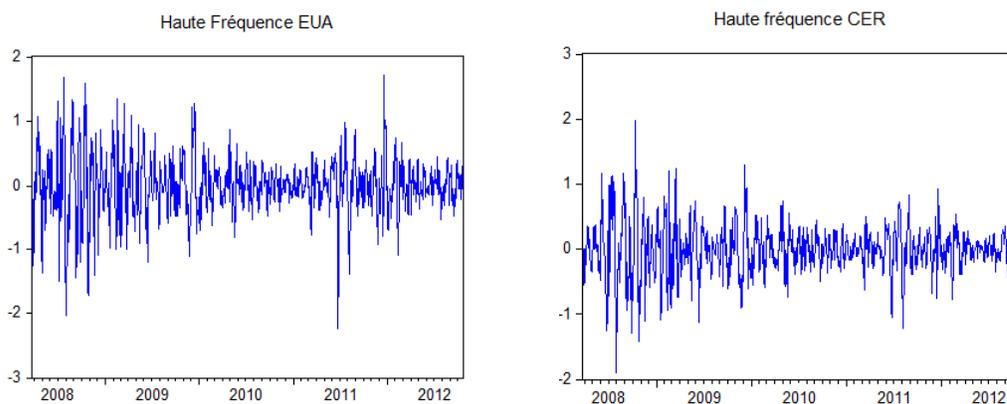


Figure 2.6: Bande à Haute fréquence

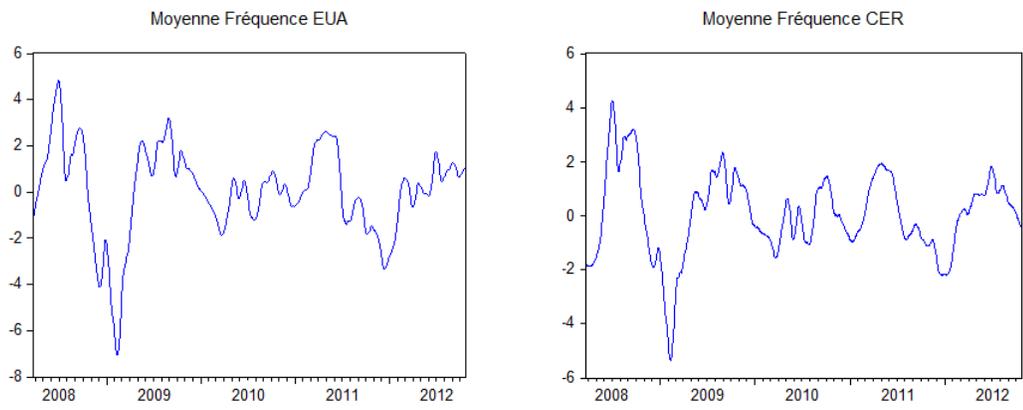


Figure 2.7: Bande à Moyenne fréquence

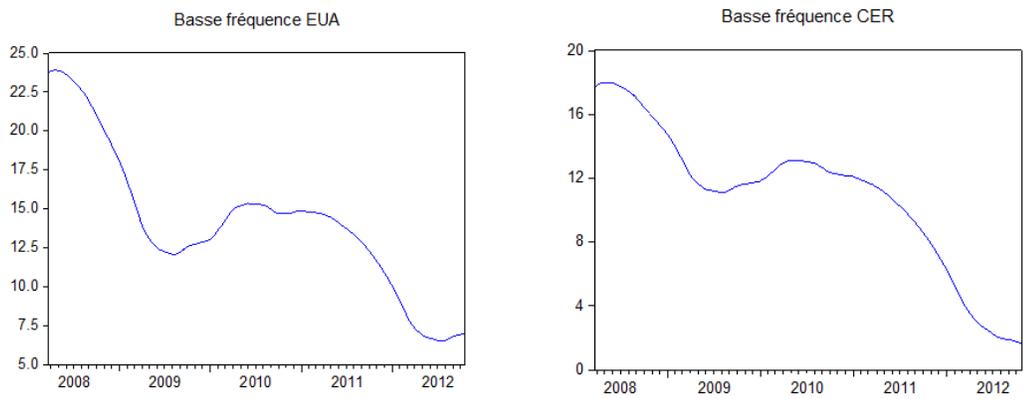


Figure 2.8: Bande à Basse fréquence

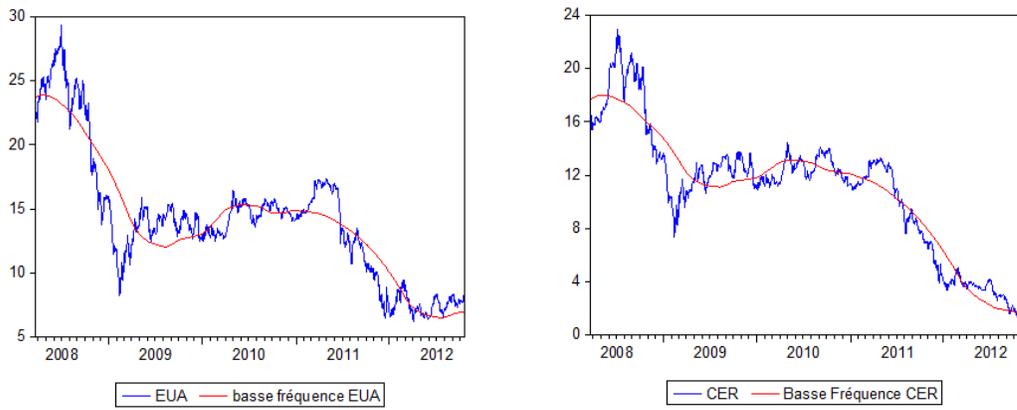


Figure 2.9: Bande à basse fréquence, EUA et CER

### 2.3.1 Régression multi-échelle entre EUA et le CER

L'étude de la régression linéaire entre les prix du quota et du crédit carbone pour les différents horizons d'investissements est présentée dans le Tableau ??.

Régression par ondelettes entre le EUA et le CER									
	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>6</sub>	D <sub>7</sub>	D <sub>8</sub>	D <sub>9</sub>
$\alpha$	2.25E-06	1.95E-05	1.17E-05	9.97E-06	-4.86E-05	-8.13E-05	-4.38E-05	-6.88E-05	9.47E-06
$\sigma_\alpha$	(0.0060)	(0.0776)	(0.07241)	(0.0876)	(-0.51856)	(-1.19273)	(-0.9117)	(-1.1639)	(0.3091)
$\beta$	0.6416	0.6797	0.6650	0.78917	0.50057	0.5671	0.1117	0.1521	-0.0260
$\sigma_\beta$	(35.4547)	(44.2857)	(46.6094)	(47.1794)	(36.1482)	(33.5794)	(14.0460)	(15.3594)	(-8.9905)
$R^2$	0.5132	0.6219	0.6457	0.6512	0.52295	0.4861	0.1420	0.1652	0.06350
F stat	1257.038	1961.225	2172.439	2225.898	1306.699	1127.579	197.2927	235.9121	80.8300
Prob	(0.0000)	(0.0000)	(0.0000)	(0.0000)	(0.0000)	(0.0000)	(0.0000)	(0.0000)	(0.0000)

Table 2.12:  $EUA_t = \alpha + \beta * CER_t + \epsilon_t$

On constate que les valeurs des  $R^2$  ne sont pas stables avec l'augmentation des échelles de temps. Ces dernières présentent des coefficients estimés significatifs et positifs, sauf pour la bande  $D_9$  (équivalent à une période de 256 à 512 jours) qui laisse apparaître un coefficient estimé ( $\beta$ ) négatif. La bande  $D_1$  (équivalent à une période de 2 à 4 jours) possède un coefficient significativement positif, ce qui signifie que les crédits carbones (CER) issue du mécanisme pour le développement propre (MDP) sont une bonne couverture pour s'acquies de leurs obligations de conformité sur le marché européen de carbone.

La table ?? présente les résultats de la régression linéaire simple entre le prix du quota et celui du crédit carbone pour les différents horizons d'investissement selon les 3 phases:

	Court Terme	Moyen Terme	Long Terme
$\alpha$	0.000033	-0.000564	-0.000402
$\sigma_\alpha$	0.069332	-2.8659	-4.825
$\beta$	0.659763	0.475907	0.035126
$\sigma_\beta$	39.59830	30.12903	6.509
$R^2$	0.5681	0.432	0.34
$F - statistique(Prob)$	1568.026(0.0000)	907,75(0.0000)	42.377(0.0000)

Table 2.13: Résultats des estimations de l'équation  $EUA_t = \alpha + \beta * CER_t + \epsilon_t$  pour différents horizons d'investissement

Quels que soient les différents horizons d'investissement ( court, moyen et long terme ), il existe une forte relation positive significative entre les deux prix. Le prix du crédit carbone entre en compte dans l'explication de celui du quota carbone et inversement. En d'autres termes il existe une relation positive sur les différentes horizons d'investissement entre le prix du quota carbone issue du système communautaire des échanges de quota d'émission (SCEQE) et celui du crédit carbone issue du mécanisme pour le développement propre (MDP). Le MDP est donc un outil efficace d'aide à la compensation pour les différents agents intervenants sur le marché européen.

### 2.3.1.1 Causalité multi-échelle entre l'EUA et le CER

Pour préciser la nature des relations précédentes pour chaque bande de fréquence, nous étudions la relation de causalité entre l'EUA et le CER en effectuant le test de causalité linéaire de Granger (table ??).

Tests de causalité Hypothèse	Granger Linéaire	
	$EUA \Rightarrow CER$	$CER \Rightarrow EUA$
$D_1$	0.0913	<b>2.E-08</b>
$D_2$	0.1758	0.1055
$D_3$	0.4766	0.2100
$D_4$	0.4751	<b>0.0052</b>
$D_5$	0.6810	0.4898
$D_6$	0.6677	0.2814
$D_7$	0.2835	0.2168
$D_8$	0.1282	0.7299
$D_9$	0.1196	0.2990
$D_{10}$	<b>2.E-05</b>	<b>2.E-11</b>
$A_{10} (>1024)$	<b>1.E-07</b>	<b>9.E-09</b>

Table 2.14: Tests de causalité linéaire (P-values)

Nous observons une instabilité de la causalité au sens de granger dans les différentes bandes de fréquences. A court terme la relation est unidirectionnelle ( $D_1, D_4$ ) partant du marché des crédits vers celui des quotas carbones, contrairement au moyen et au long terme où elle est bi-directionnelle ( $D_{10}, A_{10}$ ) .

En retenant le comportement à court terme des agents intervenant sur les marchés, il apparait que les variations de prix sur le marché de crédit carbone exercent une influence significative sur celles du marché du quota carbone. Cela signifie que le niveau de spéculation sur le SCEQE est animé

par la caractéristique a priori volatile du marché des crédits carbone. La détection de la causalité à moyen et long terme signifie que les opérateurs ayant une périodicité de trading moyen ou long participent à la construction des composantes de moyenne et de basse fréquence des prix du quota et du crédit carbone.

### 2.3.1.2 Co-intégration multi-échelle entre l'EUA et le CER

La relation de co-intégration entre l'EUA et le CER (suggérée par la tendance commune entre le prix de l'EUA et celui du CER (figure ??)) est étudiée sur les bandes de basses fréquences (long terme) issues de la décomposition par ondelettes. Nous utilisons pour cela le test de co-intégration de Johansen (1988).

Pour déterminer l'ordre d'intégration des deux séries, nous effectuons le test de Dickey-Fuller sur les séries de basse fréquences puis sur celles différenciées ( $\Delta EUA_{BF}$  et  $\Delta CER_{BF}$ ).

Table 2.15: Test de Dickey-Fuller

	T-Statistique	Valeur Critique
$EUA_{BF}$	-1.8281	-1.9410
$\Delta EUA_{BF}$	<b>-2.1883</b>	-1.9410
$CER_{BF}$	-2.0779	-3.4136
$\Delta CER_{BF}$	-2.5373	-3.4136
$\Delta^2 CER_{BF}$	<b>-4.3250</b>	-3.4136

Les résultats obtenus (table ??) laisse présager qu'il existe une relation de cointégration entre les 2 séries.

La régression entre le EUA et CER (table ??) qui utilise le sens de la causalité trouvée entre les deux prix, possède des résidus (table ??) non stationnaires. La relation n'est donc pas intégrée et confirme le résultat obtenu précédemment entre les deux séries brutes en niveau.

Table 2.16: Estimation de la relation statique entre  $EUA_{BF}$  et le  $CER_{BF}$

Variable dépendante : $EUA_{BF}$				
Variables	Coefficient	Ecart-type	T-Statistique	Prob
$CER_{BF}$	0.9796	0.0090	108.2944	0.0000
C	3.3428	0.1068	31.2921	0.0000
Coefficient de détermination	0.9076			
F-statistique	11727.68			
Prob(F-statistique)	0.0000			

Table 2.17: Test de Dickey-Fuller sur les résidus de la regression de basse fréquence

	T-Statistique	Valeur Critique
Résidus	<b>-2.7211</b>	-3.4135

Les prix EUA et CER influencés par des agents ayant un comportement de trading de long terme, n'ont donc aucune relation sur le marché carbone. Le test de la Trace du modèle des bandes à basse fréquences nous permet d'analyser cette relation. Pour effectuer le test de la trace, il est nécessaire de préciser d'abord les spécifications à retenir :

- Absence ou présence de constante dans le modèle VECM.

- Absence ou présence de constante et de tendance dans les relations de cointégration.

Le test de la trace va s'effectuer en supposant :

- L'existence d'une constante dans la relation de long terme et non dans les données (pas de constante dans le modèle à correction d'erreur).
- L'existence d'une constante dans la relation de long terme et aussi dans les données (présence d'une constante dans le modèle à correction d'erreur).
- Constante dans la relation de cointégration mais pas dans le modèle VECM.

Table 2.18: Test de cointégration de la trace

hypothèse	Trace-Statistique	Valeur Critique	Prob
Absence de Cointégration	13.9799	20.2618	0.2908
Il y a au plus 1 relation de cointégration	3.6264	9.1645	0.4706

Le test de la trace accepte l'hypothèse nulle d'absence de cointégration ( $13.9799 < 20.2618$ ) au seuil statistique de 5% dans le cas où il existe une constante dans la relation de cointégration mais pas dans le modèle VECM.

- Constante dans la relation de cointégration et dans le modèle VECM.

Table 2.19: Test de cointégration de la trace

hypothèse	Trace-Statistique	Valeur Critique	Prob
Absence de Cointégration	12.2169	15.4947	0.1468
Il y a au plus 1 relation de cointégration	2.0855	3.8414	0.1487

Il y a absence de cointégration car l'hypothèse nulle d'absence de cointégration a été acceptée ( $12.2169 < 15.4947$ )

### 2.3.1.3 Modélisation multi-échelle entre l'EUA et le CER

L'absence de racines unitaires sur les bandes à haute et moyenne fréquences conduit à retenir une modélisation de type VAR entre les prix EUA et CER à ces fréquences.

- Estimation VAR à Haute Fréquence

Le critère d'information de Schwartz permet de sélectionner un modèle VAR à 5 retards sur les bandes à haute fréquence. Les retards 2, 3 et 4 du prix du quota carbone et 4 du prix du crédit carbone, n'étant pas significatifs, nous retenons le modèle VAR(5) contraint de la table ???. Il existe aussi des interactions uni et bi-directionnelle, confirmées par les tests de causalité multi-échelle précédent.

Table 2.20: Modélisation VAR(5) à haute fréquence

	HFEUA	HFCER
HFEUA(-1)	0.5336 <b>[15.1077]</b>	-0.0810 <b>[-2.6843]</b>
HFEUA(-5)	-0.13311 <b>[-4.0364]</b>	0.01727 [0.6127]
HFCER(-1)	0.55334 <b>[13.4047]</b>	0.8591 <b>[24.3510]</b>
HFCER(-2)	-0.29798 <b>[-5.8885]</b>	-0.03596 [-0.8314]
HFCER(-3)	0.00782 [0.1526]	0.1250 <b>[2.8538]</b>
HFCER(-5)	0.0543 [1.2328]	-0.1709 <b>[-4.5377]</b>
constante	0.0007 [0.0986]	0.0005 [0.0759]

Afin d'approfondir l'interaction dynamique entre les EUA et les prix des CER, nous utilisons les fonctions de réponse impulsionnelle (R.I). Ces fonctions pour les hautes fréquences se présentent de la façon suivante:

Figure 2.10: Réponse de CER à l'impulsion de l'écart-type sur EUA

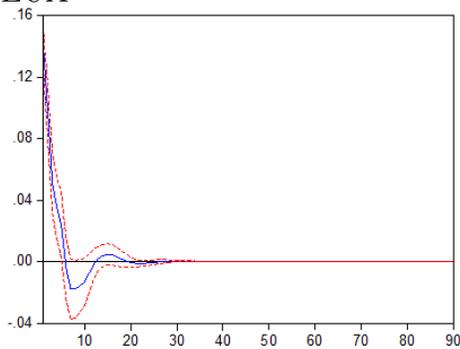
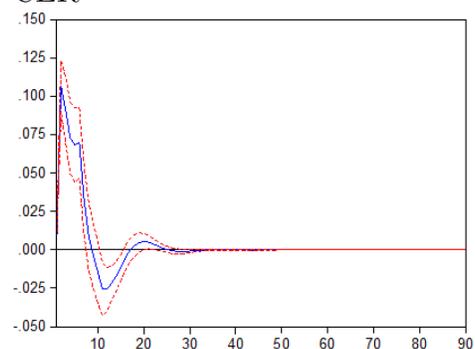


Figure 2.11: Réponse de EUA à l'impulsion de l'écart-type sur CER



Selon le modèle de VAR(5) estimé et compte tenu des marges d'erreurs, l'impact dynamique de l'écart-type sur le prix des quotas européen a un effet

significatif positif et immédiat sur le prix du CER dès le 1<sup>er</sup> jour (figure ??).

En d'autres termes, un choc positif sur le prix des EUA augmente le prix du CER pendant 1 jour avant que l'effet soit négatif du 8<sup>ième</sup> jour au 10<sup>ième</sup>, l'effet redevient ensuite positif du 11<sup>ième</sup> au 19<sup>ième</sup> avant qu'il ne retourne à son niveau initial. Le choc positif sur le CER n'est pas instantané le 1<sup>er</sup> jour sur le prix du quota européen qui ne réagit pas de façon significative à ce choc. Ce dernier se répercute sur le prix du quota au 2<sup>ième</sup> jour en s'amortissant. L'impact du choc disparaît au bout de 30 jours (figure ??).

- Estimation VAR à Moyenne Fréquence

Un modèle VAR(14) (Table ??) est retenu à ces fréquences en utilisant les critères d'informations de Hannan-Quinn (HQ), Schwartz, AIC, Final prediction error (FPE). C'est aussi un modèle contraint dans la mesure où le paramètre du retard 14 du quota carbone n'est pas significatif.

Table 2.21: Modélisation VAR(14) à Moyenne fréquence

	MFEUA	MFCER
MFEUA(-1)	2.8839 <b>[40.8818]</b>	-0.0197 [-0.3466]
MFEUA(-2)	-3.2938 <b>[-15.5205]</b>	0.1272 [0.7430]
MFEUA(-3)	2.5787 <b>[8.4507]</b>	-0.2747 [-1.1159]
MFEUA(-4)	-2.7463 <b>[-8.1339]</b>	0.3478 [1.2768]
MFEUA(-5)	3.2781 <b>[9.1272]</b>	-0.3894 [-1.3436]
MFEUA(-6)	-2.8760 <b>[-7.3151]</b>	0.4915 [1.5495]
MFEUA(-7)	1.9946 <b>[4.7234]</b>	-0.6255 [-1.5495]
MFEUA(-8)	-2.0593 <b>[-4.8692]</b>	0.54470 [1.5963]
MFEUA(-9)	2.6607 <b>[6.7416]</b>	-0.2658 [-0.8347]
MFEUA(-10)	-2.3415 <b>[-6.7416]</b>	0.2544 [0.8347]
MFEUA(-11)	1.57214 <b>[4.6285]</b>	-0.4430 [-1.6167]
MFEUA(-12)	-1.1358 <b>[-3.6920]</b>	0.3722 [1.4999]
MFEUA(-13)	0.6162 <b>[2.8749]</b>	-0.1363 [-0.7882]
MFCER(-1)	0.013786 [0.15775]	2.9239 <b>[41.4740]</b>
MFCER(-2)	-0.1565 [-0.5951]	-3.5840 [-16.8860]
MFCER(-3)	0.377602 [0.9980]	3.2177 <b>[10.5422]</b>
MFCER(-4)	-0.4867 [-1.1640]	-3.5670 <b>[-10.5728]</b>
MFCER(-5)	0.5480 [1.2283]	4.2299 <b>[11.7508]</b>
MFCER(-6)	-0.7214 [-1.4673]	-4.1049 <b>[-10.3480]</b>
MFCER(-7)	0.9487 [1.7906]	3.5539 <b>[8.3140]</b>
MFCER(-8)	-0.8048 [-1.4673]	-3.3933 <b>[-10.3480]</b>
MFCER(-9)	0.3328 [0.6742]	3.2744 <b>[8.2223]</b>
MFCER(-10)	-0.3132 [-0.6984]	-2.9180 <b>[-0.8314]</b>
MFCER(-11)	0.62579 [1.4867]	2.6160 <b>[7.7036]</b>
MFCER(-12)	-0.5120 [-1.3415]	-1.9987 <b>[-6.4905]</b>
MFCER(-13)	0.14444 [0.5433]	0.9001 <b>[4.1969]</b>
MFCER(-14)	0.0017	-0.1523

Avec ce modèle les valeurs présentes des deux prix ne dépendent que de leurs propres valeurs retardées et, ne subissent aucune influence mutuelle.

Les Fonction de RI à Moyenne fréquence issues du modèle VAR(14) se présentent de la façon suivante:

Figure 2.12: Réponse de CER à l'impulsion de l'écart-type sur EUA

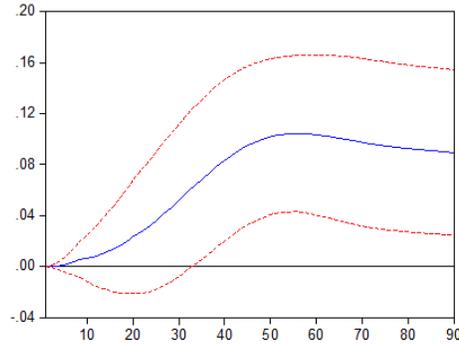
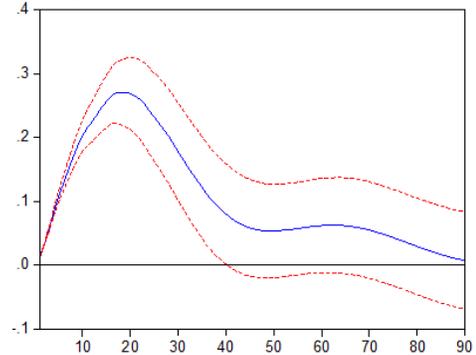


Figure 2.13: Réponse de EUA à l'impulsion de l'écart-type sur CER



Les figures ?? et ?? résultent de l'estimation du VAR(14) de la table ??. Le choc sur le EUA de moyenne fréquence (figure ??) n'a pas d'influence sur le CER (la courbe relative au CER de moyenne fréquence débute à l'origine). Le choc sur le CER n'a pas d'influence instantanée sur le EUA, et ne se repercute sur lui qu'au 5<sup>ème</sup> jour. Il s'amortit vers le 40<sup>er</sup> jour, et disparaît (figure ??).

En définitive, la relation de causalité uni-directionnelle observée à partir des rendements des séries brutes est identique à celle observée sur les bandes à haute fréquences (confirmant la présence de ces rendements à ces fréquences). La causalité est par contre bi-directionnelle pour des agents qui ont un comportement de trading de moyen et long terme. La modélisation VAR entre le EUA et le CER sur les bandes à haute fréquence

VAR(5) diffère de celle obtenue sur les bandes à moyenne fréquence VAR(14). Nous observons que ces deux modèles présentent une interconnexion significative entre le prix de l'EUA et celui du CER et une transmission rapide des chocs d'un prix à l'autre. Cependant, nous avons décelé une non co-intégration sur les bandes à basse fréquences des deux séries de prix.

## 2.4 Conclusion

Dans le chapitre 2, nous avons analysé les interactions entre l'EUA issus du SCEQE et le CER issus du MDP. Dans le domaine temporel nous décelons l'existence d'une causalité uni-directionnelle allant du CER vers le EUA conforme aux faits observés de l'accélération du mécanisme pour le développement propre (MDP). Le recours à ce mécanisme s'est accru fortement et a entraîné une baisse du prix du CER. Les entreprises de l'annexe-B ont procédé à une vente massive de leurs permis attribués gratuitement, pour acheter des crédits carbone issus du MDP à un prix extrêmement bas. La baisse du prix du CER et la hausse de celui du quota carbone en fin de phase confirme les résultats que nous avons obtenus par la causalité. L'intérêt des industriels s'est focalisé sur le MDP, et cette stratégie a impacté le prix de l'EUA sur le marché européen du carbone. La dynamique par l'intermédiaire du VAR(1) entre l'EUA et le CER révèle une interconnexion entre les deux prix sur la période étudiée.

Pour préciser ces résultats nous recourons à la décomposition en ondelettes de nos séries à laquelle nous adossons l'hypothèse d'hétérogénéité des agents qui interviennent sur les marchés.

Dans ce domaine temps fréquence nous montrons que quels que soient les différents horizons d'investissement retenus (court, moyen et long terme), il existe une relation positive significative entre les deux séries de prix. La

causalité dynamique par ondelettes sur chaque paires de bandes de fréquence, décèle cependant une relation instable entre le EUA et le CER:

- Pour les opérateurs concernés par les bandes à hautes fréquences de trading, il existe une causalité uni-directionnelle partant du marché des crédits vers celui des quotas carbone. En d'autres termes, les stratégies d'investissement à court terme réalisées sur le marché du crédit carbone européen affectent de manière significative celles de leurs homologues sur le marché des quotas carbone et non l'inverse. L'existence de cette relation à court terme est due à l'importance qu'occupe le MDP depuis sa création par le protocole de Kyoto. En effet, l'une des stratégies de réduction des GES dans l'atmosphère est la mise en place de mécanismes de flexibilité issus de ce protocole. Actuellement, le plus important est le MDP considéré par la plupart des pays comme un instrument utile et efficace qui peut conduire à une réduction de leurs émissions de GES tout en maintenant leurs activités économiques. Il permet aussi aux pays en développement de participer à la protection de la planète, en fournissant une grande quantité de crédits de compensation. Sa force est sa capacité à faire travailler ensemble les pays industrialisés et les pays en développements dans le but de lutter de façon significative contre le réchauffement de la planète. L'établissement d'une relation entre le SCEQE et le MDP est un des instruments de politique mis au point par l'UE pour répondre à ses exigences de conformité.

- Les opérateurs qui par leurs comportements occupent les moyens et long horizon de trading, montrent une causalité bi-directionnelle. La dynamique de prix du quota carbone de moyenne et basse fréquence du SCEQE cause celle du prix du crédit carbone et inversement. Les spéculateurs qui opèrent sur les deux marchés carbone sont aussi influencés réciproquement par le comportement des agents à moyenne et basse fréquence de trading. Les opérations spéculatives de l'EUA sur le SCEQE affectent donc les cours du

CER sur le MDP et inversement.

Cette relation de causalité bi-directionnelle est vraisemblablement la conséquence de la politique de contrainte imposée par l'Union Européenne sur l'obtention des crédits issus du MDP. Les agents intervenants sur le marché européen de carbone ne peuvent pas dépasser 13.5% d'obtention de CER par rapport à leurs quotas disponibles. En outre, les prix des quotas sont déterminés dans le SCEQE, qui est le marché le plus important du monde pour la lutte contre l'émission des GES et par le nombre de transactions de quota qui y circulent (Banque mondiale, 2008). Le marché des crédits carbonés issus de MDP est relativement nouveau ce qui explique que son activité à moyen et long terme affecte linéairement le marché européen de carbone.

En définitive, il existe une relation entre le SCEQE et le MDP qui dépend de la prise en compte des différents horizons d'investissement, et qui est conforme à l'hypothèse selon laquelle les agents n'ont pas le même comportement de trading.

## Chapter 3

# Analyse temps-fréquence du co-mouvement entre le marché européen du $CO_2$ et les autres marchés de l'énergie

Depuis l'entrée en vigueur en 2005 du système communautaire d'échange de quotas d'émission (SCEQE) Européen, la mise en place d'un prix sur les quotas carbone a permis aux différents industriels de prendre conscience de l'impact de leurs émissions sur l'environnement et sur la biodiversité. À la suite des décisions prise par l'Union Européenne sur l'installation des centres de gestions des émissions de  $CO_2$ , les permis ont été octroyés par leur gouvernement afin qu'ils émettent une certaine quantité de dioxyde de carbone qui doit être négocié, sur plusieurs marchés: spot, contrats à terme et les marché d'options.<sup>1</sup>

Ces installations renferment des secteurs émetteurs des grandes quantités

---

<sup>1</sup>Une partie de ce chapitre a été publié (confère Bibliographie numéro 153)

de  $CO_2$ , en particulier les raffineries de pétroles, les usines sidérurgique, les usines de production de ciment, verre, céramique, papier . . . .

Les installations émettrices de  $CO_2$  européennes permettent aux Entreprises d'être conscients des conséquences de la pollution sur l'environnement. Le Non-respect du fonctionnement du marché carbone a impliqué automatiquement une pénalité de 40 Euro/ $tCO_2$  (euros par tonne de  $CO_2$ ) dans la première phase (2005-2007), et de 100 Euro/ $tCO_2$  pour la deuxième phase du marché.

Les Entreprises émettrices qui payent leur amende suite aux émissions excédentaires, doivent toutefois respecter leur obligation de restituer un nombre de quotas égal à leurs émissions excédentaires lors de la restitution des quotas par rapport à l'année civile suivante.

L'achat et la vente sur les marchés de l'énergie (pétrole, le Gaz et le Charbon) sont directement corrélés avec les fluctuations du prix du carbone, selon les normes en vigueur qui ont été proposé par le SCEQE.

L'analyse de la relation de co-mouvement pouvant exister entre le marché du carbone et ceux du secteur de l'énergie a été abordé par certains auteurs. En effet, les travaux proposés par Mansanet-Bataller et al. (2007) et celui d'Alberola et al. (2008) ont permis d'analyser l'effet des conditions météorologiques et des prix de l'énergie sur les fluctuations des prix du carbone. Mansanet-Bataller et al. (2007) ont utilisé les écarts des indices de température de leurs moyennes saisonnières pour calculer les périodes de jours très chauds et très froids imprévus, afin d'analyser leur influence sur les rendements quotidiens de prix au comptant du carbone en partant de leur effet sur la demande d'électricité.

Les résultats de ces études suggèrent que seuls les écarts extrêmes de températures produits par des conditions météorologiques peuvent expliquer la

forte utilisation de l'électricité et donc son impact sur le prix des quotas d'émission carbone.

Alberola et al. (2008) montrent par exemple que la plupart des besoins d'énergie du secteur de la production d'électricité sont remplis dans les marchés, et les changements de prix à terme reflètent les changements dans l'attente industrielle. Ainsi, une baisse inattendue de la production domestique de gaz naturel pourrait conduire à une augmentation de son prix tant au comptant que sur les marchés futures et donc entraîner une transmission de volatilité du marché du gaz vers celui de la production d'électricité, qui va à son tour provoquer une demande plus forte que prévu des émissions de carbone.

Il faut donc souligner que les travaux de Mansanet-Bataller et al. (2007), et Alberola et al. (2008) se sont focalisés sur la relation des variations de prix à terme des émissions intensives des combustibles hydrocarbonés, tels que le charbon et le gaz naturel, et le prix des quotas d'émission. Leurs résultats confirment le rôle essentiel que jouent les prix de l'énergie à terme dans la fixation des prix des quotas d'émission de carbone.

L'effet des prix de l'énergie sur le carbone a également été proposé par Bunn et Fezzi (2007). Ces derniers ont analysé l'impact du SCEQE Européen sur le marché de gros de l'électricité au Royaume-Uni. Les résultats d'une estimation d'un modèle vecteur autorégressif (VAR) co-intégré soulignent le rôle essentiel du prix de l'énergie, en particulier celui du gaz naturel, pour déterminer le prix des quotas d'émission.

Toutes les études réalisées, se sont fondées sur l'hypothèse d'homogénéité des agents intervenants sur les différents marchés.

Afin de compléter ces analyses, nous proposons dans ce chapitre une étude du comouvement entre les marchés du pétrole, du Gaz, du charbon avec celui du carbone, en faisant appel à l'approche de la cohérence en ondelettes.

### **3.1 Une présentation des différents marchés énergétiques retenues dans l'analyse**

Dans cette section nous proposons la présentation des différents marchés énergétiques que nous avons retenu. Nous mettons en exergue leurs caractéristiques économiques et les liens pouvant exister avec le marché carbone issu du système communautaire d'échange de quota d'émission (SCEQE). L'analyse porte sur les prix de 3 secteurs d'énergie:

- Le prix du marché du pétrole
- Le prix du marché du gaz
- Le prix du marché du charbon

Ces marchés de l'énergie se sont développés à des périodes et pour des raisons très différentes. Ceci peut s'expliquer par la nature différente des produits qui s'échangent sur ces marchés.

Cette présentation permettra la préparation de l'analyse économétrique multi-échelle qui sera traitée dans ce chapitre.

#### **3.1.1 Analyse du marché du pétrole**

Le marché du pétrole est celui sur lequel s'effectue l'achat et la vente du pétrole après son extraction, puis transformé par les industries pétrolières.

Cependant, la littérature économique nous rapporte qu'il est très difficile d'anticiper l'évolution du prix du pétrole, puisqu'il existe plusieurs déterminants qui interviennent dans sa structure.

Compte tenu du nombre des déterminants existants dans ce secteur, nous en avons retenu 9 qui entrent principalement en compte dans l'explication des fluctuations du prix du pétrole:

- L'épuisement prochain des réserves.
- La disponibilité de l'offre de pétrole et son coût d'accès.
- Le taux d'utilisation des capacités de production
- La capacité d'absorption des économies exportatrices
- Le rythme de croissance de la demande de pétrole
- Le pouvoir demarché de certains opérateurs
- La spéculation sur les marchés
- L'évolution du cours du dollar
- Les tensions politiques
- ...

Il existe donc plusieurs facteurs qui impactent l'évolution du prix du pétrole. Par exemple avant le premier choc pétrolier de 1973 à 1974, le baril du pétrole était de 2\$ US, il s'est retrouvé à 12\$ pour atteindre 40\$ pendant le deuxième choc pétrolier de 1979 à 1980. En 1986, le prix du pétrole avait baissé pour atteindre moins de 10\$; pour la guerre de golf de 1990 le prix avait pu atteindre 40\$ pour encore se retrouver à 10\$ entre 1998 et 1999 pendant la période la crise asiatique. Nous observons une croissance exponentielle depuis l'an 2000:

- En 2004 le baril était à 40\$
- En 2005 il était à 50\$
- Toujours en 2005, pendant l'ouragan katrina, il était à 70\$, pour atteindre le sommet le plus haut, 100\$, le 2 janvier 2008
- En juillet 2008, le baril était à 147\$
- Cependant, les craintes liées à la crise financière asiatique, avaient fait baisser ce prix en dessous de 40\$ en fin 2008
- ...
- Le baril du pétrole le 14 avril 2016 était de 41.59\$

Toutes ces fluctuations du prix du baril du pétrole, montrent l'impact qu'ont les différents facteurs qui interviennent sur ce marché.

Jusqu'au en 1974, la quasi-totalité du pétrole qui était vendu, s'échangeait à un prix fixe et faisait l'objet de contrats de commercialisation à long terme. Le marché spot du pétrole s'est en effet développé tardivement par rapport à celui d'autres secteurs. Il ne jouait ici qu'un rôle d'appoint, qui permettait l'échange des seuls produits finis. Toutes les quantités excédentaires raffinées du pétrole, étaient échangées sur ce marché.

Cependant, juste après le premier choc pétrolier de 1974 et jusqu'à nos jours, le marché spot du pétrole est devenu incontournable. C'est sur ce marché que s'effectue la rencontre directe de l'offre et de la demande des barils du pétrole

Le marché spot est celui qui reflète en temps réel la perception qu'a les différents agents, de l'équilibre sur le marché réel.

Ainsi le prix spot du pétrole reflète l'équilibre instantané entre l'offre et la demande mondiale, mais il est également influencé par différentes anticipations à court et moyen terme.

Au niveau de la théorie économique, le coût de production du baril du pétrole augmente avec les quantités produites alors que l'utilité de la consommation décroît lorsque le volume augmente.

Le marché du pétrole se caractérise dans son fonctionnement par 3 grandes phases:

- Le court terme, période pendant laquelle la production du pétrole est peu élastique aux prix, puisque l'on ne peut pas suspendre ou reprendre l'exploitation d'un gisement sans la prise en compte des coûts. En particulier, le prix de marché doit se structurer sous le coût opératoire - relativement faible pour l'essentiel de la production mondiale, de l'ordre de  $90 \text{ Mb/j}^2$  et supérieur à  $30 \text{ US\$/b}$  pour seulement  $0.7 \text{ Mb/j}$  - pour que la production d'un puit soit arrêtée. L'ajustement conjonctuel entre l'offre et la demande pétrolière est principalement réalisé grâce aux stocks: lorsque la consommation excède la production, les cours spot augmentent afin d'inciter les détenteurs de stocks à s'en défaire; ils baissent en période de surcapacité jusqu'à ce qu'un opérateur soit prêt à acheter le pétrole pour l'entreposer et le revendre plus tard.
- À moyen terme (d'un à trois ans) en revanche, la production et la consommation peuvent s'ajuster. Les coûts de production et l'élasticité de la demande au prix jouent donc un rôle fondamental dans la détermination des anticipations des prix, que reflètent dans une large mesure

---

<sup>2</sup>million de baril par jours

les cotations dites à termes. Les variations des prix sur les marchés spot et futures sont fondamentalement liées les unes aux autres, car la possibilité de stocker le pétrole permet des opérations d'arbitrage intertemporel. Le différentiel entre les prix au comptant et à terme dépend de la vision que les opérateurs ont de l'évolution de l'équilibre physique entre l'offre et la demande, et donc de l'intérêt relatif du stockage.

- À plus long terme, une période de prix élevés (respectivement bas) peut inciter l'Organisation des pays exportateurs de pétrole (l'OPEP) à accroître (resp. diminuer) ses quotas de production; une fois la décision prise, une trentaine de jours sont nécessaires afin qu'elle devienne effective (mise en marche ou arrêt des installations et délais de transport).

Table 3.1: Les principaux exportateurs de pétrole dans le monde (chiffres 2008)

Par pays	Production en 2008 (millions barils/jour)
Arabie Saoudite	10.8
Russie	9.9
Iran	4.3
Mexique	3.1
Emirats Arabes-Unis	2.9
Koweït	2.8
Venezuela	2.5
Irak	2.4
Norvege	2.4
Nigeria	2.1
Libye	1.7
Angola	1.6
Algérie	1.4
Indonésie	0.8
Qatar	0.8

Table 3.2: Recettes pétrolières et quotas de production

Pays de l'OPEP	recettes en 2008 (en milliardsde US\$)	Quota en 2009 (en millions)
Algérie	69	1.20
Angola	68	1.51
Arabie Saoudite	285	8.01
Equateur	10	0.43
Emirats Arabes Units	89	2.23
Iran	82	3.33
Irak	60	2.37
Koweit	80	2.22
Libye	57	1.47
Nigeria	70	1.70
Qatar	38	0.73
Venezuela	59	2.01
Total OPEP	968	27.22

### 3.1.2 L'Analyse du marché du Gaz

Le marché du Gaz naturel, contrairement à celui du pétrole n'est pas unifié. Il est subdivisé en 3 zones géographiques dans lesquelles la formation des prix obéit à des principes très différents:

- le marché nord-américain
- le marché européen
- le marché asiatique

Les 3 marchés ont cependant des barrières à l'entrée. Le gaz est relativement coûteux à transporter ce qui impacte considérablement ses prix.

La littérature économique rapporte que, la part du gaz naturel dans le bilan primaire mondial est de 24% (et aussi 24% au sein de l'Union européenne).

La part du gaz naturel produit qui donne lieu à un commerce international est de l'ordre de 25% (donc sensiblement inférieur à celle du pétrole, de l'ordre de 55% ).

Il y a trois pays qui se partagent 60% des réserves mondiales de gaz:

1. La Russie (30%)

2. L'Iran (15%)

3. Qatar (15%)

Table 3.3: Les producteurs de Gaz naturel dans le monde (chiffres 2008)

Par pays	Pourcentage
Russie	21%
États-Unis	19%
Canada	6%
Iran	4%
Norvège	3%
Pays-Bas	2,7%
Algérie	2,6%
Qatar	2,5%
, Indonésie	2,4%
Chine	2,4%
Autres	34,4%

Table 3.4: Les principaux exportateurs de Gaz naturel dans le monde (chiffres 2008)

Par pays	Pourcentage
Russie	23%
Norvège	12%
Canada	11%
Qatar	7%
Algérie	7%
Turkménistan	6%
Pays-Bas	5%
Indonésie	4%

Table 3.5: Les principaux importateurs de Gaz naturel dans le monde (chiffres 2008)

Par pays	Pourcentage
Japon	12%
Les États-Unis	11%
Allemagne	10%
l'Italie	10%
l'Ukraine	7%
La France	6%
L'Espagne	5%
La Turquie	5%
La Corée du sud	5%
Royaume-Uni	3%

Les 10 premiers producteurs représentent, à eux seuls, les deux-tiers de la production mondiale, les 10 premiers exportateurs 80% des échanges internationaux et les 10 premiers importateurs 75% de ces échanges.

Sur le marché international, le nombre d'acteurs présents est donc sensiblement plus faible qu'avec le pétrole, et le gaz reste une énergie réservée à des importateurs industrialisés.

Les marchés spot du gaz se sont développés plus tardivement hors des États Unis. En Europe, le prix du gaz est le plus souvent indexé contractuellement sur le prix des produits pétroliers; aux États-Unis, le principe de l'indexation formelle sur le cours du pétrole a été abandonné mais le prix spot du gaz est longtemps resté corrélé aux prix du fiouls sur une longue période, malgré des écarts parfois importants à court terme liés aux spécificités de l'offre et de la demande de gaz.

La formation du prix spot du pétrole s'applique également au prix du gaz, mais le marché gazier est plus complexe et certains facteurs spécifiques doivent être pris en compte.

Comme pour le pétrole, le prix spot exprime à la fois l'équilibre instantané entre l'offre et la demande, que reflètent les variations de stocks, et les possibilités d'arbitrage intertemporel selon les anticipations de prix et le coût (de 4 à 6 EUR/MWh/an en général) ou le bénéfice du stockage.

En revanche, le commerce du gaz présente des caractéristiques qui introduisent quelques contraintes. En premier lieu, le gaz est un produit plus difficile à transporter et son marché n'est pas unifié, comme rappelé précédemment. De plus, des logiques différentes distinguent ces marchés, dont le niveau de maturité est très variable.

### **3.1.3 L'analyse du marché du Charbon**

Le marché du charbon occupe une place importante dans le secteur de l'énergie compte tenu de sa teneur en émission de gaz à effet de serre. Le premier pays producteur et consommateur de charbon dans le monde est la chine (avec 2761 millions de tonnes métriques produites en 2008). En effet en 1949, la chine produisait à peine 40 millions de tonnes de charbon. Les États-Unis sont le deuxième producteur et consommateur de charbon mais loin derrière la chine (1007 millions de tonnes produites en 2008).

Table 3.6: Les principaux acteurs du marché international du charbon (en million de tonnes, chiffres 2008); Source AIE

Pays producteurs	Quantité du Charbon Mt
Chine	2761
États-Unis	1007
Inde	489
Australie	325
Russie	247
Indonésie	246
Afrique du sud	236
kazakhstan	104
Pologne	84
Colombie	79
Reste du monde	267
Monde	5845

Table 3.7: Les principaux acteurs du marché international du charbon (en million de tonnes, chiffres 2008); Source AIE

Pays exportateurs nets	Quantité du Charbon Mt
Australie	252
Indonésie	203
Russie	76
Colombie	74
Afrique du sud	60
États-Unis	43
kazakhstan	27
Canada	20
Vietnam	20
Venezuela	6
Reste du monde	12
Monde	793

Table 3.8: Les principaux acteurs du marché international du charbon (en million de tonnes, chiffres 2008); Source AIE

Pays importateurs nets	Quantité du Charbon Mt
Japon	186
Coré du sud	100
Taiwan	66
Inde	58
Allemagne	46
Royaume-Uni	43
Italie	25
France	21
Turquie	19
Espagne	19
Reste du monde	195
Monde	778

Le marché du charbon est devenu très proche de celui du pétrole, avec quelques spécificité comme une moins grande transparence, l'importance plus grande du fret dans la formation des prix et une différenciation technique plus nette entre les quantités des produits offerts.

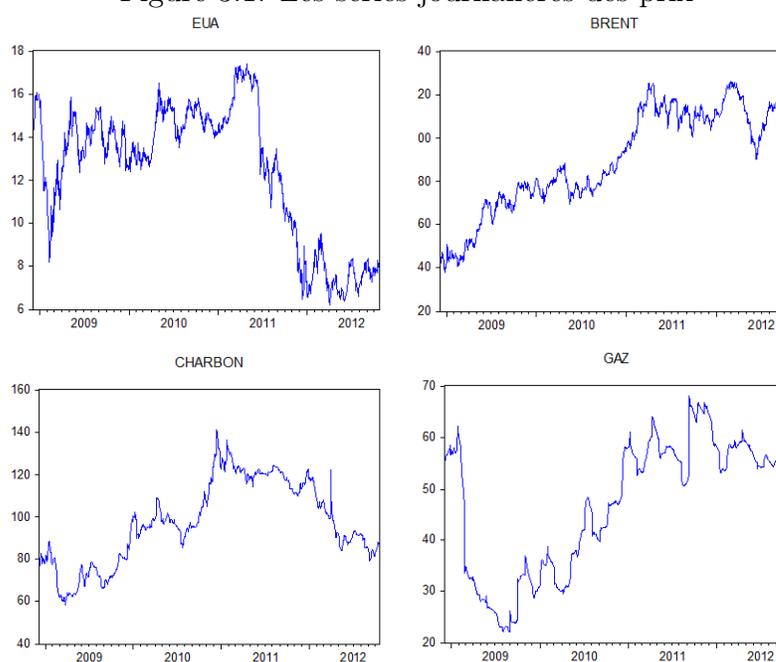
La littérature économique rapporte qu'il existe beaucoup d'éléments qui conduisent à considérer le marché du charbon comme concurrentiel. Le fonctionnement de ce marché est étroitement lié à celui du carbone. Puisque le but ultime du marché carbone est la réduction des émissions des GEZ, dont le carbone (charbon) occupe une très grande place.

### 3.1.4 Présentation et caractéristiques des données

Nous utilisons, les données journalières issues de l'European Climate Exchange (ECX), des prix du  $CO_2$ , du Brent, du charbon et du gaz sur la période du 08 décembre 2008 au 19 octobre 2012 (1010 observations). L'Étude porte sur la phase II (2008-2012) du SCEQE qui est la plus représentative du marché carbone par rapport à sa phase I (2005-2007), qui était une phase d'essai et où les quotas étaient fournis gratuitement aux agents.

Les évolutions de ces prix sont représentées dans la figure ?? et permettent de constater des comportements très différenciés au cours du temps. Elles ont cependant comme trait commun la présence de composantes de basse fréquence.

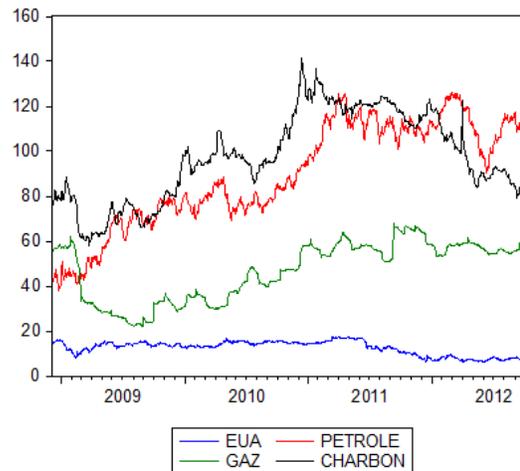
Figure 3.1: Les séries journalières des prix



### 3.1.4.1 Les tests de racines unitaires

Afin de tester la présence de racine unitaire dans les séries de prix que nous avons retenu dans ce chapitre, nous recourons dans un premier temps aux tests traditionnels: le test de Phillips-Perron(1988), et celui de Kwiatkowski,Phillips,Schmidt et Shin(1992). Par la suite, nous faisons appel au test de Zivot-Andrews (1992) qui prend en compte les ruptures structurelles dans les séries de prix.

Figure 3.2: Séries brutes



### 1. Tests de Phillips et Perron

Le test de Phillips & Perron est une extension de celui du Dickey-Fuller. Ce test intègre l'autocorrélation et l'homoscédasticité des erreurs. Les hypothèses faites sur les résidus dans les modèles de régression de Dickey-Fuller sont moins restrictives puisque les erreurs peuvent présenter une faible dépendance temporelle et être distribuées de façon hétérogène, c'est-à-dire non i.i.d<sup>3</sup>, mais asymptotiquement indépendantes.

La procédure de test de Phillips et Perron peut être utilisée en se référant aux valeurs critiques asymptotiques tabulées par Dickey-Fuller.

En utilisant le logarithme de chaque prix de clôture  $P_t$  au temps  $t$  de tous les marchés analysés, le rendement  $R_t$  qui lui correspond s'écrit:  $R_t = Ln(\frac{P_t}{P_{t-1}})$ . Le test de Phillips et Perron (table ??) accepte l'hypothèse de la présence d'une racine unitaire dans la série  $P_t$ . De ce fait la

---

<sup>3</sup>indépendantes et identiquement distribuées

transformation en rendement ne modifie pas la structure restante de la chronique.

Les résultats du test de Phillips et Perron sur les séries de prix sont présentés dans le tableau ?? ci-dessous montrent que les statistiques de test sont toujours supérieures aux valeurs critiques. Les séries EUA, petrole, gaz et charbon possèdent une racine unitaire.

Table 3.9: Test Phillips et Perron

Séries brutes	T-Statistique	valeurs critiques
EUA	-1.235650	-2.864193
$\Delta EUA$	<b>-30.566</b>	-3.414
Petrole	-1.938762	-2.864193
$\Delta Petrole$	<b>-26.212</b>	-3.414
Gaz	-1.220211	-2.864193
$\Delta Gaz$	<b>-31.219</b>	-3.414
Charbon	-1.490646	-2.864193
$\Delta Charbon$	<b>-32.449</b>	-3.414

## 2. Le Test Kwiatkowski, Phillips, Schmidt et Shin (KPSS)

Le test de Kwiatkowski, Phillips, Schmidt et Shin (KPSS) est fondé sur l'hypothèse nulle de stationnarité en niveau et autour d'une tendance déterministe linéaire contre l'hypothèse alternative de racine unitaire. Ce test est un cas particulier d'un test proposé antérieurement par Nabeya et Tanaka (1988). En effet, les tests classiques de racine unitaire présentés antérieurement, se révèlent d'une puissance faible contre certaines alternatives spécifiques. Cela se manifeste souvent dans le cas où le processus générateur de la série analysée est un modèle autorégressif comportant une racine proche de l'unité. L'on peut retrouver le même type de raisonnement lorsque ce processus est fractionnaire

(Diebold et Rudebusch (1991)).

Cela est dû à la construction même des tests classiques de racine unitaire, qui sont modélisés de telle sorte que l'hypothèse nulle de racine unitaire soit favorisée aux dépens de l'hypothèse alternative d'absence de cette racine.

Les résultats du test de Kwiatkowski, Phillips, Schmidt et Shin (KPSS) sur les séries de prix sont présentés dans le tableau ?? ci-dessous montrent que Les statistiques LM du test KPSS sont toutes supérieures aux valeurs critiques au seuil de 5%. On rejette l'hypothèse nulle et tous les modèles sont considérés comme non stationnaire.

Table 3.10: Test de Kwiatkowski, Phillips, Schmidt et Shin (KPSS)

Séries brutes	T-Statistique (LM-KPSS)	valeurs critiques
EUA	2.033460	0.463000
Petrole	3.444200	0.463000
Gaz	2.574511	0.463000
Charbon	1.867617	0.463000

Nous allons procéder à un test de racine unitaire qui prend en compte la présence des ruptures stucturelles dans les séries de prix. Le but est d'analyser la présence ou non des ruptures dans les séries que nous avons retenue afin de pouvoir les rendre stationnaire en integrant les ruptures si elles existent.

### 3. Le test de Zivot-Andrews (1992)

Le test de Zivot-andrews (1992) est un test de ruptures structurelles endogène qui utilise un échantillon complet d'une série et une variable muette ou dummy variable différente pour chaque rupture possible.

La date de la rupture dans la structure de la série est sélectionnée lorsque la T-statistique du test de racine unitaire est à son minimum (fortement négatif). Les valeurs critiques dans zivot-Andrews (1992) sont différentes des valeurs critiques dans perron (1989). La différence est due à ce que la sélection du temps de la rupture est considérée comme le résultat d'une procédure d'estimation, plutôt qu'une détermination exogène.

Figure 3.3: Prix EUA

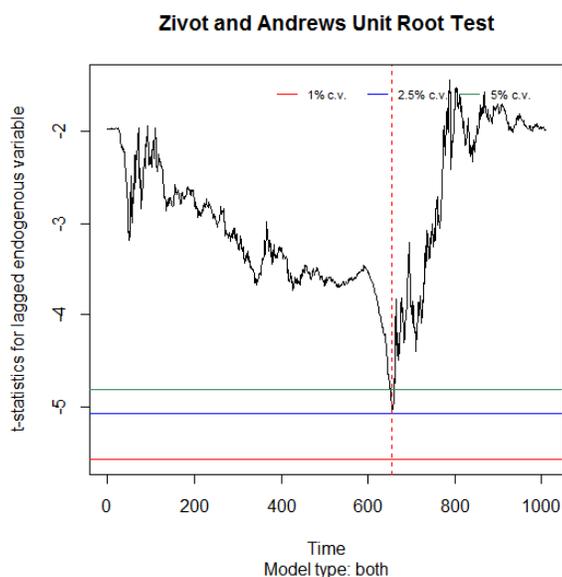


Figure 3.4: Prix du Gaz

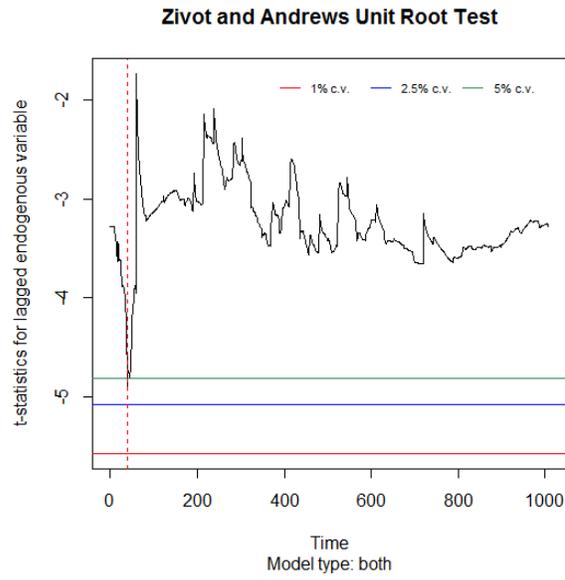


Figure 3.5: Prix du petrole

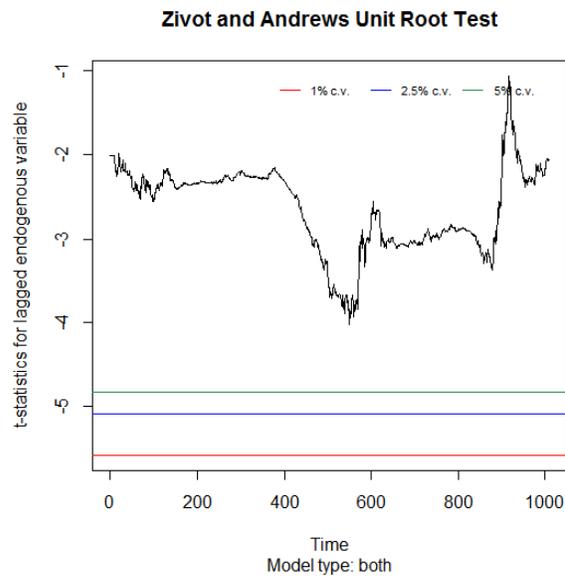
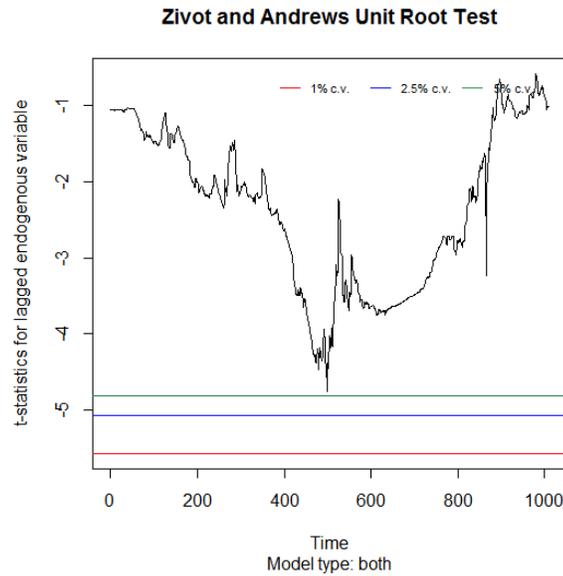


Figure 3.6: Prix du Charbon



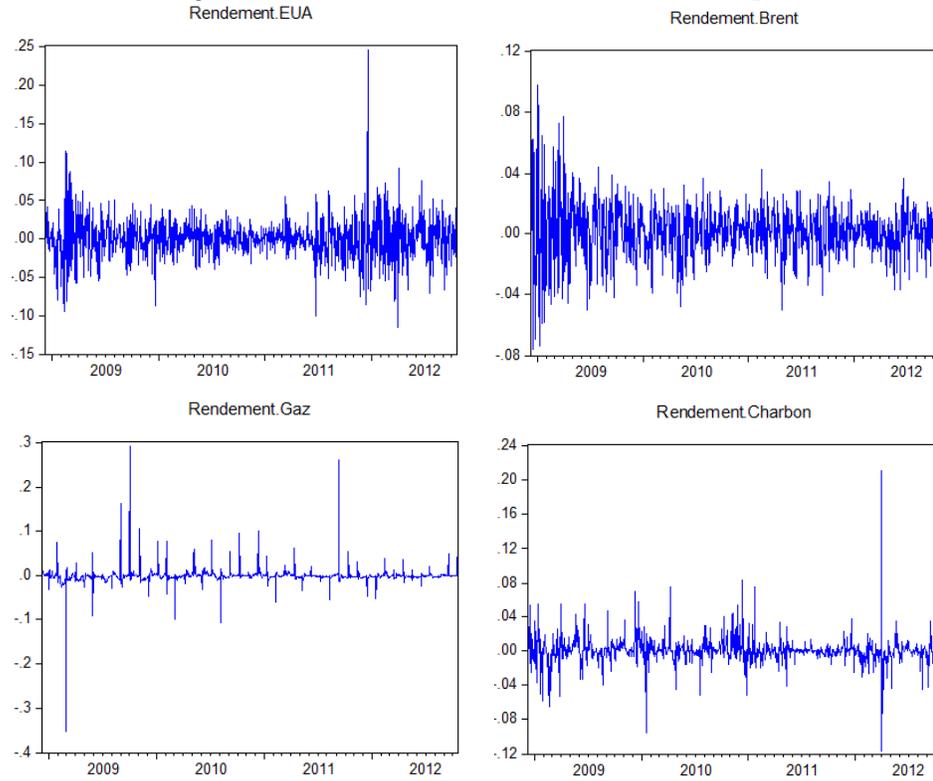
Les figures ??, ??, ??, ?? présentent des séries dont les T-statistiques sont négatifs, ce qui renvoie à l'existence de racine unitaire. Cependant, il n'ya que les figures ?? et ??, celle des prix de l'EUA et du Gaz qui présentent des ruptures dans leurs structures.

Le fait qu'il existe dans les séries de prix une racine unitaire, leur stationnarisation va se faire par le biais du filtre aux différences premières comme réalisé précédemment lors du test de Phillips et Perron.

### 3.1.4.2 Les rendements des séries de prix

Le rendement  $R_t$  de chaque série de prix dont la formule est  $R_t = \ln\left(\frac{P_t}{P_{t-1}}\right)$  est représenté dans le tableau ci-dessous.

Figure 3.7: Rendements hebdomadaire des prix



Les évolutions de ces rendements consignées dans la (figure ??) indiquent des structures principalement hétéroscédastiques d'ampleur plus ou moins importantes.

De plus les tests de racine unitaire sur les rendements confirment l'absence d'autres composantes de ses basses fréquences.

Le Tableau ?? présente les statistiques descriptives des rendements des prix EUA, pétrole, Gaz et Charbon.

Table 3.11: Statistiques descriptives de rendements des prix Hebdomadaires

Rendements	EUA	Pétrole	Charbon	Gaz
Moyenne	-0.000597	0.000965	0.000162	0.000109
Mediane	0.000000	0.001427	0.000000	-0.000454
Maximum	0.245247	0.097685	0.210570	0.290978
Minimum	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Std. Dev.	0.027118	0.017824	0.015111	0.021647
Skewness	0.563177	0.134612	2.418221	0.503377
Kurtosis	10.90372	5.984840	48.73792	130.6180
Jarque-Bera	2679.631	377.6078	88932.78	684748.3
Probabilité	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
Somme	-0.602567	0.973780	0.163695	0.110198
Sum Sq. Dev.	0.741293	0.320235	0.230168	0.472356
Observations	1009	10009	1009	1009

Les coefficients d'asymétrie des distributions sont tous positifs: les hausses des rendements des prix sur les 4 marchés sont plus probables que les baisses sur la période étudiée. Les valeurs du kurtosis supérieures à 3 révèlent la présence d'une leptokurticité des distributions par rapport à la distribution normale.

Les corrélations (Tableau ??) entre les différents rendements de prix sont positifs mais peu significativement différents de zéro. Ce constat laisse présager que les relations économiques entre les marchés sont tenues et incite à recourir à une méthodologie différente pour les analyses comme la décomposition par ondelettes.

Rendements	EUA	PETROLE	CHARBON	GAZ
EUA	1			
PETROLE	0.031361	1		
CHARBON	0.065603	0.009764	1	
GAZ	0.021940	0.0067163	0.012068	1

Table 3.12: Coefficients de corrélation linéaire entre les rendements de prix des différents marchés

### 3.1.4.3 Analyse multivariée du prix du carbone et de ceux du secteur de l'énergie

L'analyse multivariée permet de modéliser les liens pouvant exister entre le taux de croissance du prix du quota carbone et ceux du secteur énergétique en faisant appel au modèle vecteur autoregressif (VAR)<sup>4</sup>.

La détermination du nombre de retard optimal VAR(p) s'effectue par l'estimation des VAR pour des ordres de retards p allant de 1 à 8.

Les résultats obtenus sélectionnent le modèle VAR(1) en se fondant sur le critère SC ( Schwarz information criterion ). Son estimation est présentée sur la figure ci-dessous :

---

<sup>4</sup>confère l'annexe 2.1

Figure 3.8: Nombre de retards p du modèle VAR(p)

Lag	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
0	10024.33	NA	2.37e-14	-20.02063	-20.00101*	-20.01317
1	10063.64	78.22898	2.26e-14	-20.06720	-19.96913	-20.02993*
2	10082.08	36.56226	2.25e-14*	-20.07209*	-19.89556	-20.00500
3	10095.92	27.31913	2.26e-14	-20.06778	-19.81278	-19.97086
4	10103.67	15.23275	2.30e-14	-20.05129	-19.71783	-19.92456
5	10113.90	20.02834	2.33e-14	-20.03976	-19.62783	-19.88321
6	10128.90	29.24907*	2.33e-14	-20.03776	-19.54737	-19.85139
7	10141.31	24.10622	2.35e-14	-20.03059	-19.46174	-19.81440
8	10150.76	18.27318	2.38e-14	-20.01750	-19.37019	-19.77149

\* Indicates lag order selected by the criterion  
 LR: sequential modified LR test statistic (each test at 5% level)  
 FPE: Final prediction error  
 AIC: Akaike information criterion  
 SC: Schwarz information criterion  
 HQ: Hannan-Quinn information criterion

Figure 3.9: Estimation du processus VAR(1)

	DLCHARBON	DLEUA	DLGAZ	DLPETROLE
DLCHARBON(-1)	0.040374 (0.03151) [ 1.28115]	-0.192858 (0.05627) [-3.42753]	0.023282 (0.04516) [ 0.51551]	0.107816 (0.03671) [ 2.93681]
DLEUA(-1)	-0.038877 (0.01757) [-2.21280]	0.036318 (0.03137) [ 1.15775]	-0.068248 (0.02518) [-2.71055]	-0.016056 (0.02047) [-0.78450]
DLGAZ(-1)	-0.003244 (0.02200) [-0.14743]	-0.010961 (0.03928) [-0.27901]	0.011961 (0.03153) [ 0.37935]	-0.020087 (0.02563) [-0.78371]
DLPETROLE(-1)	0.033225 (0.02673) [ 1.24293]	0.118989 (0.04773) [ 2.49308]	-0.017330 (0.03831) [-0.45239]	0.149273 (0.03114) [ 4.79356]
C	8.56E-05 (0.00048) [ 0.17987]	-0.000649 (0.00085) [-0.76415]	8.54E-05 (0.00068) [ 0.12517]	0.000771 (0.00055) [ 1.39078]
R-squared	0.007538	0.018473	0.007746	0.031115
Adj. R-squared	0.003580	0.014558	0.003789	0.027251
Sum sq. resids	0.228194	0.727476	0.468677	0.309684
S.E. equation	0.015083	0.026931	0.021617	0.017571
F-statistic	1.904481	4.719171	1.957456	8.052609
Log likelihood	2799.924	2215.595	2437.186	2646.025
Akaike AIC	-5.545484	-4.386100	-4.825767	-5.240129
Schwarz SC	-5.521101	-4.361717	-4.801383	-5.215746
Mean dependent	0.000147	-0.000586	0.000114	0.000941
S.D. dependent	0.015111	0.027130	0.021658	0.017816
Determinant resid covariance (dof adj.)		2.35E-14		
Determinant resid covariance		2.31E-14		
Log likelihood		10104.45		
Akaike information criterion		-20.00882		
Schwarz criterion		-19.91129		

Les tests associés à cette estimation permettent de mieux appréhender la structure de VAR(1).

Les résultats indiquent que le rendement du carbone dépend positivement du rendement du gaz retardé d'une période, et négativement des rendements du pétrole et du charbon retardé d'une période. Le rendement du charbon dépend positivement de celui du gaz et du pétrole retardé d'une période et négativement du rendement du carbone retardé d'une période. Quant au rendement du pétrole, il dépend négativement du rendement du gaz et positivement de celui du charbon et du carbone retardé d'une période. Enfin le rendement du gaz dépend négativement des rendements du carbone, charbon et pétrole retardés d'une période.

L'étude des résidus de ce VAR(1) a pour but de mieux cerner ses caractéristiques.

- Test de normalité de Jarque Bera (J.B)

Ce test est utilisé pour déterminer si les résidus suivent une distribution normale. Il s'agit d'un test qui regroupe les tests de Skweness et de Kurtosis. Il évalue les écarts simultanés de ces coefficients avec les valeurs de référence de la loi normale.

On test les hypothèses suivantes:

$$\begin{cases} H_0 : \text{Normalité des résidus} \\ H_1 : \text{Absence de normalité des résidus} \end{cases}$$

Règle de décision:

Si  $JB < x^2(2)$   $H_0$  est acceptée au risque de 5% : normalité des résidus.

Si  $JB > x^2(2)$   $H_0$  est rejetée au risque de 5% : absence de normalité des résidus.

Figure 3.10: Test de Normalité

Component	Skewness	Chi-sq	df	Prob.
1	2.315360	900.6302	1	0.0000
2	0.611427	62.80562	1	0.0000
3	0.678069	77.24261	1	0.0000
4	0.131030	2.884350	1	0.0894
Joint		1043.563	4	0.0000

Component	Kurtosis	Chi-sq	df	Prob.
1	48.64116	87490.86	1	0.0000
2	10.42854	2317.695	1	0.0000
3	124.6023	621059.4	1	0.0000
4	6.263560	447.3345	1	0.0000
Joint		711315.3	4	0.0000

Component	Jarque-Bera	df	Prob.
1	88391.49	2	0.0000
2	2380.500	2	0.0000
3	621136.6	2	0.0000
4	450.2188	2	0.0000
Joint	712358.8	8	0.0000

Nous constatons que les coefficients de skewness sont positifs, ce qui renvoie à la présence d'une asymétrie à droite pour les résidus des prix. Il y a la présence d'une distribution leptokurtique (pointue), tous les rendements des prix ont des coefficients supérieurs à 3.

Le test de  $JB > 5.99$  et, la probabilité associée de 0.00000 est  $< 0.05$   $H_0$  est rejetée : il y a donc absence de la normalité des résidus du modèle VAR(1).

- Test d'autocorrélation du multiplicateur de Lagrange (LM)

Ce test s'appuie sur 2 hypothèses, à savoir :

$$\begin{cases} H_0 : \text{Absence d'autocorrélation des résidus.} \\ H_1 : \text{Présence d'autocorrélation des résidus.} \end{cases}$$

**Règle de décision :**

Si  $LM(s) < x^2(s * k) H_0$  Absence d'autocorrélation des résidus.

Si  $LM(s) > x^2(s * k) H_0$  Présence d'autocorrélation des résidus.

Figure 3.11: Test de Non Autocorrélation

VAR Residual Serial Correlation LM T...  
 Null Hypothesis: no serial correlation ...  
 Date: 03/20/16 Time: 11:27  
 Sample: 12/08/2008 10/19/2012  
 Included observations: 1008

Lags	LM-Stat	Prob
1	24.36981	0.0817
2	34.19748	0.0051
3	31.14083	0.0129
4	14.33418	0.5738
5	22.92949	0.1156
6	27.96935	0.0319
7	25.06660	0.0687
8	20.41782	0.2020
9	18.46456	0.2974
10	22.33158	0.1328
11	16.32425	0.4306
12	30.33455	0.0163

Probs from chi-square with 16 df.

Le test en modèle multivarié du multiplicateur de Lagrange ( $LM$ ) montre que l'hypothèse nulle d'absence d'autocorrélation est rejetée. Il y a présence d'autocorrélation des résidus.

- Test de khi-deux d'homoscédasticité

Ce test s'appuie sur 2 hypothèses, à savoir :

$$\begin{cases} H_0 : \text{Absence homoscédasticité des résidus.} \\ H_1 : \text{Présence hétéroscédasticité des résidus.} \end{cases}$$

Figure 3.12: Test d'homoscédasticité

Joint test:					
Chi-sq	df	Prob.			
510.2097	140	0.0000			

Individual components:					
Dependent	R-squared	F(14,993)	Prob.	Chi-sq(14)	Prob.
res1*res1	0.078784	6.065912	0.0000	79.41399	0.0000
res2*res2	0.044372	3.293341	0.0000	44.72652	0.0000
res3*res3	0.009790	0.701279	0.7746	9.868637	0.7717
res4*res4	0.111736	8.922162	0.0000	112.6294	0.0000
res2*res1	0.178375	15.39859	0.0000	179.8018	0.0000
res3*res1	0.009288	0.664960	0.8099	9.362287	0.8072
res3*res2	0.017956	1.296848	0.2023	18.09921	0.2023
res4*res1	0.031340	2.294840	0.0043	31.59097	0.0046
res4*res2	0.036173	2.661966	0.0008	36.46204	0.0009
res4*res3	0.008588	0.614384	0.8548	8.656320	0.8524

Après analyse de la figure ??, le test d'homoscédasticité des rendements des prix nous montre que l'hypothèse  $H_0$  est rejetée, il y a donc hétéroscédasticité des erreurs.

- Test de stabilisation

Ce test est utilisé pour vérifier les conditions de stabilité des valeurs propres après estimation des paramètres du modèle VAR.

Le modèle VAR est stable si toutes les racines du modèle du polynôme caractéristique ont un module inférieur à 1.

Figure 3.13: Test de stabilité

Root	Modulus
0.146477 - 0.023210i	0.148304
0.146477 + 0.023210i	0.148304
-0.062205	0.062205
0.007177	0.007177

No root lies outside the unit circle.  
 VAR satisfies the stability condition.

Toutes les racines sur la figure?? sont inférieures à 1. Nous constatons donc que notre modèle VAR respecte les conditions de stabilités. Ce test est vérifié par la représentation du cercle unitaire puisque toutes les racines sont bien à l'intérieur du cercle.

Malgré la qualité insuffisante des tests précédents on utilise par la suite les caractéristiques du VAR(1) pour étudier les relations entre les prix énergétiques.

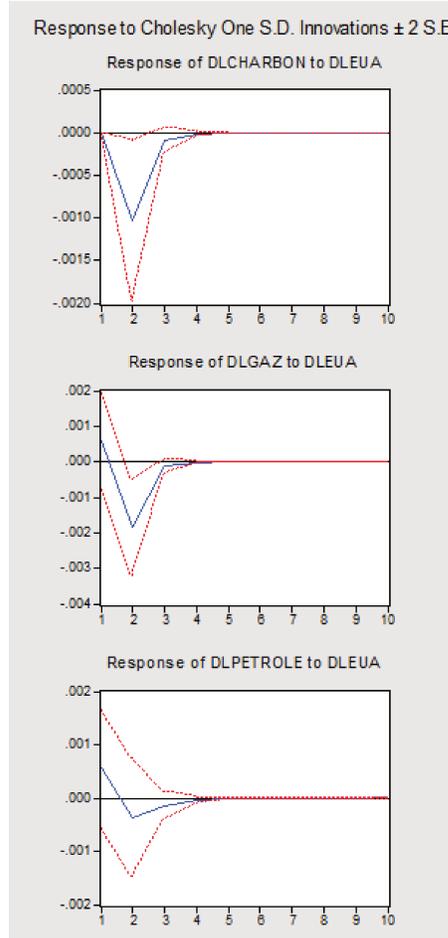
- La fonction de réponse impulsionnelle

La fonction de réponse impulsionnelle représente l'effet d'un choc d'une innovation sur les valeurs courantes et futures des variables endogènes. Un choc sur la  $i$ ème variable peut affecter directement cette  $i$ ème variable, mais il se transmet également à l'ensemble des autres variables au travers de la structure dynamique du VAR.

L'idée générale de l'analyse des chocs (ou fonction de réponse aux innovations) est de résumer l'information concernant l'évolution d'une composante suite à une impulsion sur une autre composante à la date  $t = 0$ , en supposant

que toutes les autres variables sont constantes pour  $t < 0$ . Les fonctions de réponse impulsionnelle nous informent sur les évolutions directionnelles des variables d'une part, et sur l'ampleur de ces déviations d'autre part.

Figure 3.14: Réponse des 4 rendements suite au choc sur le rendement EUA



Il s'agit ici de la fonction de réponse impulsionnelle des rentabilités du prix du pétrole, du gaz et du charbon suite à un choc sur les rentabilités du prix du quota du carbone. Nous constatons que le choc du rendement du prix du quota du carbone se répercute immédiatement sur le rendement des

prix du secteur de l'énergie et se stabilise à zéro dès la 5<sup>ème</sup> période.

- Décomposition de la variance de l'erreur de prévision

Partant de la décomposition des résidus en innovations "pures" ou orthogonales, on peut calculer quelle est la contribution de chaque innovation à la variance totale de l'erreur de prévisions du processus  $X_{i,t}$ .

Il s'agit ici d'une analyse de la déformation d'un système par comparaison entre les résultats de la prévision "naturelle" et ceux obtenus après l'introduction d'un choc unitaire sur les innovations.

L'information est cependant moins détaillée que celle produite par les fonctions de réponse impulsionnelle; il s'agit d'une information globale pour l'ensemble du modèle. L'objectif est de calculer pour chacune des innovations sa contribution à la variance de l'erreur.

Figure 3.15: Réponse des 4 rendements suite au choc sur le rendement EUA

Variance Decomposition of DLEUA:					
Period	S.E.	DLCHARBON	DLEUA	DLGAZ	DLPETROLE
1	0.015083	0.494670	99.50533	0.000000	0.000000
2	0.015139	1.582197	97.82818	0.001235	0.588388
3	0.015141	1.581985	97.81791	0.001362	0.598748
4	0.015141	1.581978	97.81747	0.001366	0.599183
5	0.015141	1.581981	97.81746	0.001366	0.599194
6	0.015141	1.581981	97.81746	0.001366	0.599194
7	0.015141	1.581981	97.81746	0.001366	0.599194
8	0.015141	1.581981	97.81746	0.001366	0.599194
9	0.015141	1.581981	97.81746	0.001366	0.599194
10	0.015141	1.581981	97.81746	0.001366	0.599194

La variance de l'erreur de prévision du rendement du carbone (DLEUA) est due pour 97.81% à ses propres innovations, pour 1.58% à celles du rendement du charbon, pour 0.001% à celles du rendement du gaz et enfin pour 0.59% à celles du rendement du petrole.

Figure 3.16: Décomposition de la variance du rendement du Petrole

Variance Decomposition of DLPETROLE:					
Period	S.E.	DLCHARBON	DLEUA	DLGAZ	DLPETROLE
1	0.026931	0.000489	0.099815	0.456925	99.44277
2	0.027181	0.791823	0.137616	0.463916	98.60665
3	0.027184	0.826391	0.144019	0.464087	98.56550
4	0.027184	0.827759	0.144340	0.464089	98.56381
5	0.027184	0.827803	0.144353	0.464089	98.56376
6	0.027184	0.827804	0.144353	0.464089	98.56375
7	0.027184	0.827804	0.144353	0.464089	98.56375
8	0.027184	0.827804	0.144353	0.464089	98.56375
9	0.027184	0.827804	0.144353	0.464089	98.56375
10	0.027184	0.827804	0.144353	0.464089	98.56375

La variance de l'erreur de prévision du rendement du petrole (DLpetrole) est due pour 98.56% à ses propres innovations, pour 0.82% à celles du rendement du charbon, pour 0.14% à celles du rendement du carbone et enfin pour 0.46% à celles du rendement du gaz.

Figure 3.17: Décomposition de la variance du rendement du Gaz

Variance Decomposition of DLGAZ:					
Period	S.E.	DLCHARBON	DLEUA	DLGAZ	DLPETROLE
1	0.021617	0.004451	0.074888	99.92066	0.000000
2	0.021699	0.015102	0.790242	99.17507	0.019585
3	0.021701	0.022123	0.792696	99.15889	0.026288
4	0.021701	0.022123	0.792745	99.15868	0.026452
5	0.021701	0.022124	0.792745	99.15867	0.026457
6	0.021701	0.022124	0.792745	99.15867	0.026458
7	0.021701	0.022124	0.792745	99.15867	0.026458
8	0.021701	0.022124	0.792745	99.15867	0.026458
9	0.021701	0.022124	0.792745	99.15867	0.026458
10	0.021701	0.022124	0.792745	99.15867	0.026458

Cholesky Ordering: DLCHARBON DLEUA DLGAZ DLPETROLE

La variance de l'erreur de prévision du rendement du gaz (DLgaz) est due pour 99.15% à ses propres innovations, pour 0.02% à celles du rendement du charbon, pour 0.79% à celles du rendement du carbone et enfin pour 0.02% à celles du rendement du petrole.

Figure 3.18: Décomposition de la variance du rendement du charbon

Variance Decomposition of DLCHARBON:					
Period	S.E.	DLCHARBON	DLEUA	DLGAZ	DLPETROLE
1	0.017571	100.0000	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.017841	99.39072	0.460984	0.000409	0.147883
3	0.017850	99.38706	0.464258	0.000430	0.148257
4	0.017851	99.38693	0.464372	0.000430	0.148268
5	0.017851	99.38693	0.464374	0.000430	0.148268
6	0.017851	99.38693	0.464374	0.000430	0.148268
7	0.017851	99.38693	0.464374	0.000430	0.148268
8	0.017851	99.38693	0.464374	0.000430	0.148268
9	0.017851	99.38693	0.464374	0.000430	0.148268
10	0.017851	99.38693	0.464374	0.000430	0.148268

Cholesky Ordering: DLCHARBON DLEUA DLGAZ DLPETROLE

La variance de l'erreur de prévision du rendement du charbon (DLcharbon) est due pour 99.38% à ses propres innovations, pour 0.14% à celles du rendement du petrole, pour 0.46% à celles du rendement du carbone et enfin pour 0.0004% à celles du rendement du gaz.

En définitive on constate que les chocs affectent principalement la variance de la variable retenue.

- Test de causalité

Une des questions que l'on peut se poser à partir du modèle Vecteur Autoregressif VAR(1) retenu dans ce chapitre est celle de savoir s'il existe une relation de causalité entre le prix du quota du carbone et ceux du secteur de l'énergie. Nous allons utiliser une causalité au sens de Granger qui s'appuie sur l'hypothèse suivante :

$$\begin{cases} H_0 : X \text{ ne cause pas } Y \text{ (absence de causalité).} \\ H_1 : X \text{ cause } Y \text{ (présence de causalité entre les variables).} \end{cases}$$

Granger Linéaire	probabilité
EUA $\Rightarrow$ <i>Pétrole</i>	0.6850
Pétrole $\Rightarrow$ <i>EUA</i>	<b>0.0377</b>
EUA $\Rightarrow$ <i>Charbon</i>	0.1327
Charbon $\Rightarrow$ <i>EUA</i>	<b>0.0004</b>
EUA $\Rightarrow$ <i>Gaz</i>	<b>0.0162</b>
Gaz $\Rightarrow$ <i>EUA</i>	0.7104

Table 3.13: Tests de causalité linéaire de Granger (P-values)

$H_0$  : DLpétrole ne cause pas au sens de Granger DLEUA, la probabilité associée est de  $0,0377 < 0,05$  donc  $H_0$  est rejetée: le rendement du pétrole cause au sens de Granger celui du carbone. A l'inverse  $0,685 > 0,05$  donc le rendement du carbone ne cause pas au sens de Granger celui du pétrole.

$H_0$  : DLcharbon ne cause pas au sens de Granger DLEUA, la probabilité  $0,0004 < 0,05$  donc on rejette l'hypothèse nulle : le rendement du charbon cause celui du carbone et  $0,1327 > 0,05$  donc le rendement du carbone ne cause pas celui du charbon au sens de Granger.

$H_0$  : DLgaz ne cause pas au sens de Granger DLEUA, la probabilité  $0.0162 < 0,05$  donc on rejette  $H_0$  :le rendement du carbone cause celui du gaz et  $0.7104 > 0.05$  donc le rendement du gaz ne cause pas celui du carbone au sens de Granger.

Dans tous les cas nous observons l'existence d'une causalité unidirectionnelle.

En définitive il existe une relation de causalité uni-directionnelle globale et stable du prix du pétrole vers celui du carbone, du charbon vers le carbone, et enfin du carbone vers le gaz. Les activités sur le marché du pétrole et celui du charbon ont un impacte considérablement sur celui du marché carbone

Européen. En effet, l'utilisation par les entreprises industrielles du pétrole et du charbon émettent des grandes quantités des GES dans l'atmosphère, ce qui explique la relation de causalité. Il serait donc judicieux aux différents intervenants du marché carbone qui ont pour but de remplir leurs obligations de conformité d'intégrer dans leur structure de coût les fluctuations du marché du pétrole et celui du charbon.

### 3.2 L'étude économétrique multi-échelle

La relation de co-mouvement entre le marché Européen du carbone et ceux de l'énergie va être analysée en intégrant l'hypothèse d'un comportement hétérogène des agents.

L'analyse va consister à considérer l'existence des différents d'investissement. Pour ce faire nous faisons appel à la transformée en ondelettes afin de décomposer la structure de chaque prix.

Considérons une chronique  $X_t$  avec une taille arbitraire de l'échantillon  $N$ , le  $j^{\text{ième}}$  niveau d'ondelettes ( $\tilde{W}_j$ ) mis à l'échelle ( $\tilde{V}_j$ ) est défini comme:

$$\tilde{W}_{j,t} = \sum_{l=0}^{L_j-1} \tilde{h}_{j,l} x_{t-l} \quad (3.1)$$

$$\tilde{V}_{j,t} = \sum_{l=0}^{L_j-1} \tilde{g}_{j,l} x_{t-l} \quad (3.2)$$

avec  $j = 1, 2, 3, \dots, J$ ;  $t = 1, 2, 3, \dots$

où  $\tilde{h}_{j,l} = \frac{h_{j,t}}{2^{\frac{j}{2}}}$  sont les filtres d'ondelettes issues du MODWT, et  $\tilde{g}_{j,l} = \frac{g_{j,t}}{2^{\frac{j}{2}}}$  les filtres d'échelles ( $L_j = [(L-2)(1-2^j)]$  étant la longueur de l'échelle  $2^j$  d'ondelettes; avec  $l = 0, 1, \dots, L_j - 1$ )

La chronique  $X_t$  se décompose alors en la somme des signaux orthogonaux suivants:

$$X_t = A(j) + D(1) + D(2) + \dots + D(j) \quad (3.3)$$

Où  $j$  est un entier positif convenablement choisi vis-à-vis des objectifs de description,  $S(j)$  est la tendance de niveau  $j$ , renfermant les composantes de  $S$  de période supérieure à  $2^j$  jours.  $D(k)$  est le détail de niveau  $k$ , renfermant les composantes du signal de période comprise entre  $2^{k-1}$  et  $2^k$  jours.

Le tableau ?? décrit les échelles d'ondelettes dans des horizons de temps appropriés, fournissant ainsi un aperçu de la relation entre les bandes de fréquences et les échelles de temps pour les séries chronologiques.

Horizons de temps	
	Echelles d'ondelettes Jours fréquents
$D_1$	1-2 jours
$D_2$	2-4 jours
$D_3$	4-8 jours
$D_4$	8-16 jours
$D_5$	16-32 jours
$D_6$	32-64 jours
$D_7$	64-128 jours

Table 3.14: Analyse multirésolution sur différents niveaux d'échelles

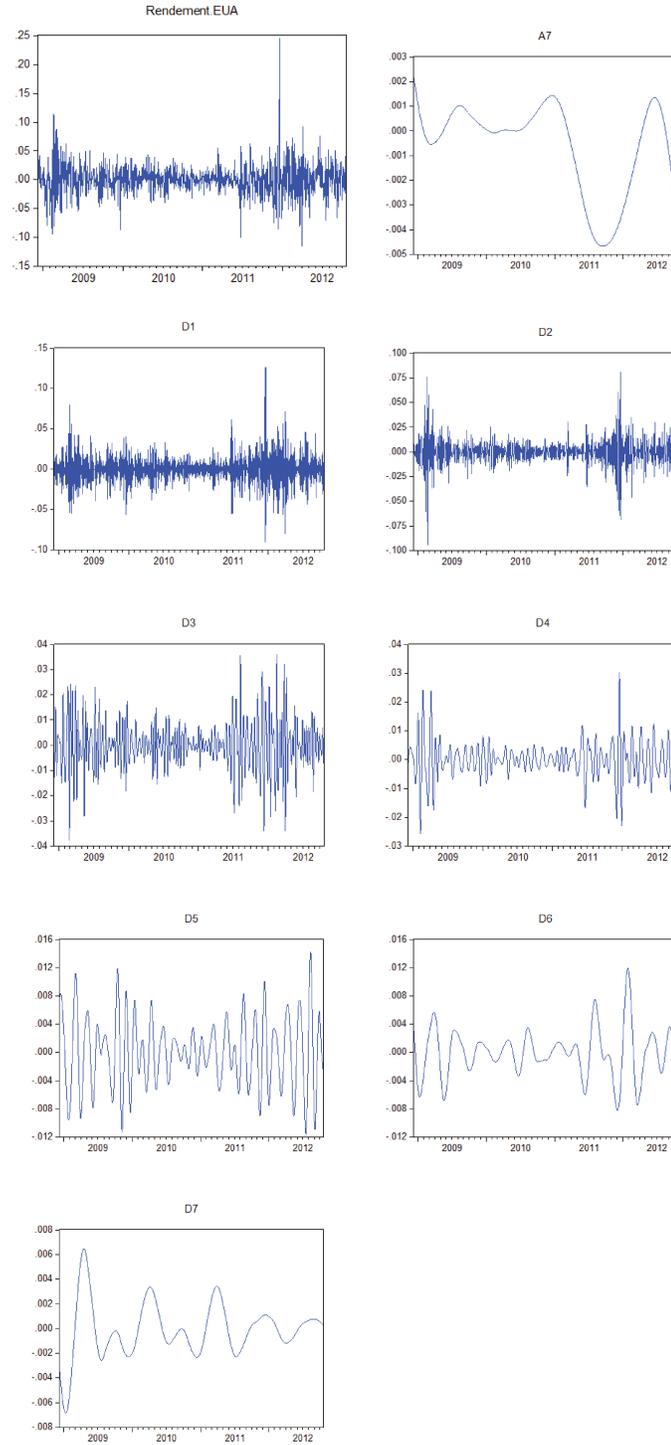
Les analyses locales s'effectuent en choisissant  $j = 7$  ( car  $2^7 = 128 < 1010$ ). L'échelle  $D_7$  des rendements correspond à des fréquences annuelles, que l'on peut raisonnablement retenir pour détecter les comportements fondamentaux dans la relation de long terme pouvant exister entre les marchés.

La figure ?? présente la décomposition par ondelettes (approximation et détails) des rendements du prix de l'EUA<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup>Les autres décompositions sont en annexe (figures ??, ??, ??)

Figure 3.19: Rendement de l'EUA



Nous observons pour les rendements du prix du quota carbone, une évolution variable sur toutes les bandes de fréquences. Les bandes  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  et  $D_4$  présentent un aspect très hétérogène alors qu'il est plutôt quasi-cyclique pour les bandes  $D_5$ ,  $D_6$  et  $D_7$ . Cette cyclicité est également observée mais de façon moindre pour la composante  $A_7$  de basse fréquence. Les agents ayant des horizons de négociation à court terme sur le marché carbone (jour-mois) sont les plus touchés par les fluctuations de ce marché. Les figures ??, ?? et ?? des rendements du prix du pétrole, du charbon et du gaz (cf annexe) montrent des évolutions similaires. Les agents affectés par les fluctuations sur ces marchés comme avec celui du carbone, sont ceux qui ont un comportement de trading de court terme.

### 3.2.1 Analyse de la corrélation dynamique par ondelettes.

L'analyse de l'interdépendance entre les différents marchés est, à présent, réalisée en utilisant les bandes des fréquences précédemment retenues (figures ??, ?? et ??).

Les traits pleins en noir correspondent aux coefficients de corrélations des rendements en ondelettes dont les valeurs sont portées sur l'axe des ordonnées. Les lignes bleues constituées du  $U$  et  $L$  correspondent respectivement aux limites supérieure et inférieure d'un intervalle de confiance à 95% robustes à la non-gaussianité. Chaque échelle de temps sur l'axe des abscisses correspond à une bande de fréquence.

Figure 3.20: Corrélation par ondelettes entre EUA et BRENT

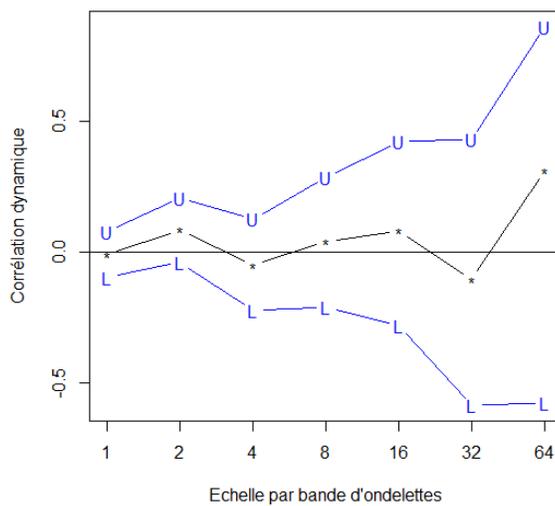


Figure 3.21: Corrélation par ondelettes entre EUA et CHARBON

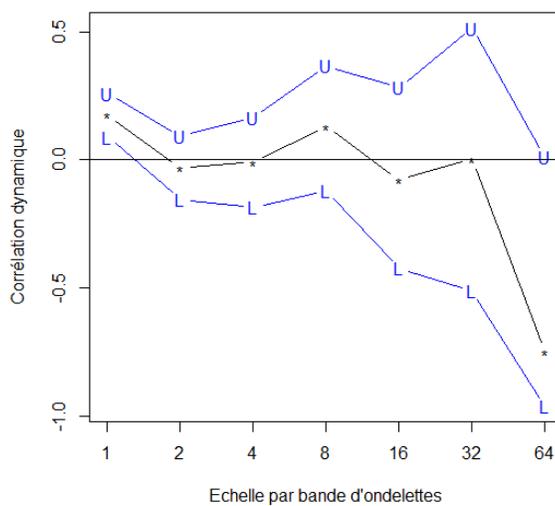
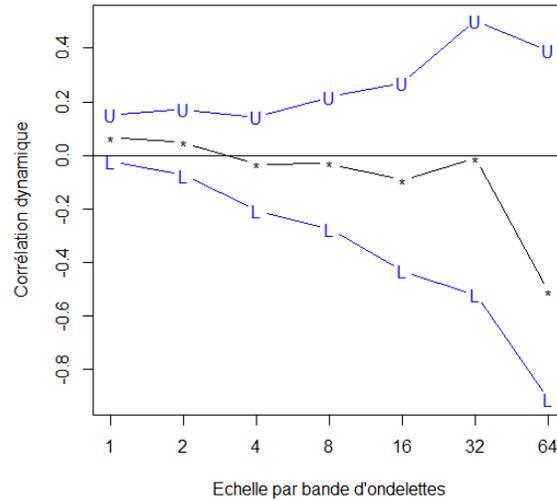


Figure 3.22: Corrélation par ondelettes entre EUA et GAZ



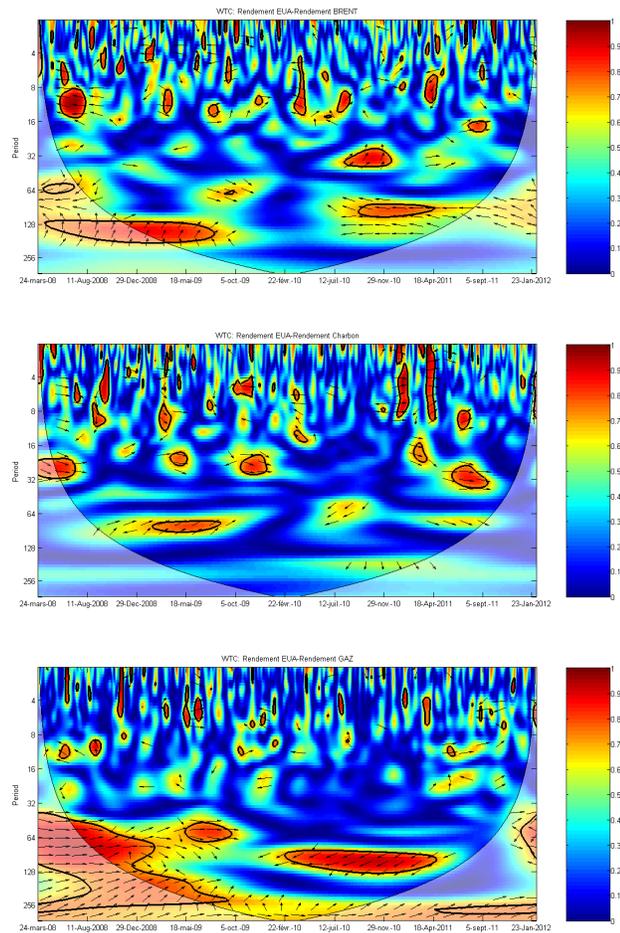
Il existe une faible corrélation négative sur les bandes  $D_1$ ,  $D_3$  et  $D_6$  entre l'EUA et le pétrole (figure ??), alors qu'elle est positive sur les autres bandes. Ces corrélations confirment qu'il existe un impact des échelles d'investissement sur ces marchés. Ces résultats complètent, en se fondant sur leurs différentes ondelettes, ceux obtenus avec les séries globales des rendements (0.031; Table ??). On constate aussi la valeur supérieure à 0.031 du coefficient de corrélation sur la bande  $A_7$  qui renferme les structures cycliques des marchés.

Les séries de rendements de l'EUA et du Charbon (figure ??) présentent une corrélation positive sur les deux bandes ( $D_1$ ,  $D_4$ ) et négative sur les autres. L'EUA et le Gaz (figure ??) ont une corrélation positive sur les deux premières bandes ( $D_1$ ,  $D_2$ ), elle est négative sur les autres.

### 3.2.2 Coherence en ondelettes entre le $CO_2$ et les marchés de l'énergie

La cohérence par ondelettes est une mesure de la corrélation locale calculée de façon non-paramétrique avec une ondelette complexe. La figure ?? ci-dessous montre la corrélation locale de chaque fréquences estimée.

Figure 3.23: Cohérence en ondelettes entre les séries de rendements



Les graphiques s'interprètent de la façon suivante:

- Le temps est représenté sur l'axe horizontal, alors que les fréquences sont sur l'axe vertical. L'interprétation des résultats est basée sur la couleur des régions. La cohérence en ondelettes permet de trouver dans les régions temps-fréquences, l'espace dans lequel les deux séries de prix co-varient.
- Les régions qui laissent apparaître des lignes noires dans lesquelles nous observons des couleurs rouges, représentent des régions à forte dépendance. Les régions renfermant la couleur bleue sont celles dans lesquelles les deux séries sont faiblement dépendantes. Plus la couleur bleue devient foncée, plus la dépendance entre nos séries baisse. Les régions en bleu foncé pour chaque fréquence au cours du temps montrent la non dépendance des deux séries.
- Les flèches indiquent les différentes phases relatives des séries temporelles à une échelle donnée. Lorsque ces flèches sont orientées vers la droite, cela signifie que les deux séries de prix sont en phase alors qu'elles sont en déphasage lorsque les flèches sont dirigées vers la gauche. Lorsqu'elles sont orientées vers le haut ou vers le bas, cela signifie que l'un des prix est plus volatile que l'autre et inversement.

L'analyse du co-mouvement entre le  $CO_2$ , le Brent, le Charbon et le Gaz montre des relations de corrélation différentes sur toutes les échelles de temps et sur les différents horizons d'investissement entre les marchés:

- Il n'y a pas de co-mouvement très significatif entre les rendements de l'EUA et du Charbon sur la période étudiée. Ce co-mouvement n'existe que sur certaines échelles de temps entre 2008 et 2012 (moyennes et basses fréquences); il n'est pas significatif sur les hautes fréquences.
- Entre mars 2008 et avril 2009, sur la bande de fréquence allant de 32 jours à 128 jours, les flèches sont dirigées vers la gauche et vers le bas: le rendement du prix de l'EUA et celui du charbon ne sont pas en phase. L'orientation vers le bas des flèches montre que le marché du charbon est plus volatile que celui du carbone.
- Entre août 2009 et mai 2011, sur la bande de fréquence à 256 jours nous observons que les flèches sont toujours orientées vers la gauche mais cette fois ci vers le haut indiquant une très grande activité sur le marché du carbone Européen (le prix du  $CO_2$  est plus élevé que celui du charbon dans cette phase). Il existe sur toutes les échelles de temps, au niveau des basses fréquences, une relation de co-mouvement entre les rendements du Brent et de l'EUA. Elle est plus forte sur quelques échelles de temps à moyenne et haute fréquences.
- Sur la période du 24 mars 2008 au 09 janvier 2012, et sur les bandes de fréquences comprises entre 128 et 256 jours, les flèches sont dirigées en majorité vers la droite et vers le haut, ce qui indique que les prix de l'EUA et du Brent sont en phase. De plus le marché du carbone est plus volatile que celui du Brent sur la période étudiée.
- Enfin, la relation de co-mouvement est plus forte entre les rendements de l'EUA et ceux du GAZ sur certaines échelles de temps à moyenne fréquence et, sur certaines échelles à haute fréquences. Il y a deux

grandes régions importantes. La première est celle qui se trouve dans la zone à moyenne fréquence entre 32 et 128 jours partant de mars 2008 à décembre 2009 et la seconde apparait en Août 2010 dans la même bande de fréquences jusqu'en janvier 2012. Au cours de la période d'étude, dans la bande de fréquences de 32 à 256 jours, les flèches sont dirigées vers la gauche et vers le bas, ce qui indique que l'EUA et le GAZ ne sont pas en phase et que le prix du GAZ est plus volatile que celui de l'EUA. Cela est peut être dû au fait qu'il y a plus d'activités spéculatives sur le marché du Gaz que sur celui du carbone.

### 3.2.2.1 Analyse de la causalité multi-échelle entre le $CO_2$ et les marchés de l'énergie

Les Tests de causalité de Granger entre les différentes séries de rendements globaux et des rendements par bandes de fréquences sont consignés dans la table ??.

Tests de causalité	Bandes de fréquences (séries de rendements)								
	série brute	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>6</sub>	D <sub>7</sub>	A <sub>7</sub>
EUA $\Rightarrow$ BRENT	0.6850	0.1528	<b>0.0028</b>	0.6711	<b>4.E-07</b>	<b>3.E-08</b>	<b>3.E-21</b>	<b>2.E-32</b>	<b>3.E-09</b>
BRENT $\Rightarrow$ EUA	<b>0.0377</b>	0.7885	0.2420	0.4790	<b>1.E-13</b>	<b>0.0001</b>	<b>9.E-21</b>	<b>9.E-11</b>	<b>3.E-105</b>
EUA $\Rightarrow$ Charbon	0.1327	0.40428	0.1557	0.4790	0.1944	<b>3.E-05</b>	<b>0.0001</b>	<b>6.E-67</b>	<b>1.E-135</b>
Charbon $\Rightarrow$ EUA	<b>0.0004</b>	<b>0.0017</b>	0.5199	0.8306	0.4277	<b>0.0027</b>	0.0551	<b>7.E-41</b>	<b>4.E-991</b>
EUA $\Rightarrow$ Gaz	<b>0.0162</b>	0.7862	<b>3.E-11</b>	0.7896	<b>0.0004</b>	<b>2.E-05</b>	<b>3.E-09</b>	<b>9.E-44</b>	<b>2.E-05</b>
Gaz $\Rightarrow$ EUA	0.7104	0.8097	<b>0.0047</b>	0.9514	<b>2.E-05</b>	<b>2.E-05</b>	<b>4.E-10</b>	<b>8.E-15</b>	<b>3.E-99</b>

Table 3.15: Tests de causalité linéaire de Granger (P-values)

- Il existe une causalité uni-directionnelle entre les rendements des séries globales partant du brent vers l'EUA, du charbon vers l'EUA et enfin

de l'EUA vers le Gaz.

- Le test de Granger indique des causalités significatives au niveau des bandes de fréquences.
  - Pour la bande  $D_1$  correspondant à une gamme de 2 à 4 jours, nous constatons une absence de causalité des rendements entre l'EUA et le Brent; l'EUA et le Gaz, alors qu'elle est uni-directionnelle, du charbon vers l'EUA (comme sur les rendements des séries globales).
  - Pour la bande  $D_2$ , correspondant à une gamme de 4-8 jours, la causalité est uni-directionnelle partant de l'EUA vers le Brent. Elle est bi-directionnelle entre l'EUA et le Gaz alors qu'elle est absente entre l'EUA et le Charbon.
  - Il y a une absence totale de relation de causalité entre les rendements de la bande  $D_3$  correspondant à une gamme de 8-16 jours.
  - La bande  $D_4$ , de 16-32 jours, indique une causalité bi-directionnelle entre l'EUA et le Brent et entre l'EUA et le Gaz alors qu'elle est absente entre l'EUA et le charbon.
  - Par contre, pour les bandes de fréquences  $D_5$ ,  $D_6$ ,  $D_7$  et  $A_7$  les causalités sont toutes bi-directionnelles sauf sur la bande  $D_6$  où elle est uni-directionnelle entre l'EUA et le charbon partant de l'EUA.

### 3.3 Conclusion

L'analyse de la relation des co-mouvements entre le prix du  $CO_2$  et les prix du marché de l'énergie (pétrole, Gaz et Charbon) est réalisée sur la phase 2 (2008-2012) du marché européen du carbone. L'étude des interconnexions entre les principaux prix de ces marchés est effectuée par des décompositions dans le domaine temps-fréquence qui permet de recourir aux cohérences et aux causalités dynamiques. Les résultats obtenus dans ce chapitre sont récapitulés dans le tableau ci-dessous:

Tableau récapitulatif

Tests de corrélation linéaire				
Rendements	EUA	BRENT	CHARBON	GAZ
EUA	1			
BRENT	positif	1		
CHARBON	positif	positif	1	
GAZ	positif	positif	positif	1

Tests de corrélation dynamique			
Bandes de fréquences	EUA et BRENT	EUA et CHARBON	EUA et GAZ
D <sub>1</sub>	négatif	positif	positif
D <sub>2</sub>	positif	négatif	positif
D <sub>3</sub>	négatif	négatif	négatif
D <sub>4</sub>	positif	positif	négatif
D <sub>5</sub>	positif	négatif	négatif
D <sub>6</sub>	négatif	négatif	négatif
D <sub>7</sub>	positif	négatif	négatif

Tests de causalité	Bandes de fréquences (séries de rendements)									
	série brute	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>6</sub>	D <sub>7</sub>	A <sub>7</sub>	
EUA ⇒ BRENT	non	non	oui	non	oui	oui	oui	oui	oui	
BRENT ⇒ EUA	oui	non	non	non	oui	oui	oui	oui	oui	
EUA ⇒ Charbon	non	non	non	non	non	oui	oui	oui	oui	
Charbon ⇒ EUA	oui	oui	non	non	non	oui	non	oui	oui	
EUA ⇒ Gaz	oui	non	oui	non	oui	oui	oui	oui	oui	
Gaz ⇒ EUA	non	non	oui	non	oui	oui	oui	oui	oui	

oui : Existence d'une causalité  
non : Absence d'une causalité

- Sur les rendements des séries brutes, nous observons des corrélations positives au cours du temps, alors qu'elles sont faibles et instables sur les rendements des séries entre les différentes bandes de fréquences liées aux différents horizons d'investissement.
- Il y a des effets cycliques provenant des séries de rendement lorsqu'ils sont observés en phase et des effets anti-cycliques lorsqu'ils ne le sont pas.

- L'étude de la causalité linéaire multi-échelle permet de conclure que les interactions entre le marché du carbone et celui de l'énergie (pétrole, charbon et gaz) ont des caractéristiques différentes à différentes échelles de temps. Le changement des relations de causalité sur les bandes de fréquence confirme l'hypothèse d'hétérogénéité des agents effectuant des investissements sur différents horizons. Ce résultat doit être confirmé par la suite en contournant l'hypothèse de linéarité sur laquelle est construite le test de Granger.

Les résultats obtenus montrent l'existence d'une corrélation positive et stable au cours du temps sur les rendements des séries brutes, alors qu'elles sont faibles et instables sur des différentes bandes de fréquences liées aux différents horizons d'investissement. Le test de la cohérence en ondelettes laisse également apparaître une corrélation dynamique différente au cours du temps et sur chaque bandes de fréquences entre l'EUA et les prix du pétrole, du Gaz et du Charbon. Le test de causalité linéaire multi-échelle réalisée entre ces différents marchés sur la période du 08 decembre 2008 au 19 octobre 2012 montre que les interactions entre le marché du carbone et celui de l'énergie (pétrole, charbon et gaz) ont des caractéristiques différentes à différentes échelles de temps. En effet, nous avons observé une absence de causalité linéaire entre l'EUA et le pétrole au niveau des agents ayant un comportement de trading de court terme lié aux bandes de fréquence  $D_1$  (2 à 4 jours) et  $D_3$  (8 à 16 jours), alors qu'elle est uni-directionnelle juste pour la bande de fréquence  $D_2$  (4 à 8 jours) allant du marché du carbone vers celui du Brent. Il y a également absence de causalité à court terme entre le marché du carbone et celui du charbon sur les bandes de fréquences  $D_2$ ,  $D_3$  et  $D_4$  (16 à 32 jours) sauf sur la bande  $D_1$  où elle est unidirectionnelle, de EUA vers le charbon comme sur les séries de rendements bruts. Pour ce qui est des marchés carbone et du gaz, il y a absence de causalité sur les bandes de fréquence  $D_1$  et  $D_3$  alors qu'elle est bidirectionnelle sur  $D_2$  et  $D_4$ , tandis qu'elle était

unidirectionnelle sur les séries de rendements bruts allant de l'EUA vers le Gaz. Au niveau des agents ayant un comportement de trading de moyen et long terme ( bandes de fréquence  $D_5$  (32 à 64 jours),  $D_6$  (64 à 128 jours),  $D_7$  (128 à 256 jours)) nous avons décelé une causalité bi-directionnelle pour les 3 relations (EUA et Pétrole, EUA et Charbon, EUA et Gaz), alors que le test de causalité pour ces mêmes relations sur les séries de rendements bruts était uni-directionnelle. D'où la présence d'agents hétérogènes sur ces marchés. L'hypothèse de l'existence des différents horizons d'investissement est donc confirmée dans cette étude. La prise en compte de cette analyse multi-échelle sur la relation entre le marché européen du carbone et les marchés de l'énergie est donc nécessaire pour les agents qui investissent sur ces différents marchés.

En définitive, en utilisant le domaine temps-fréquence, nous révélons l'instabilité des co-mouvements entre les 4 marchés, ce qui complète et clarifie les relations dans le seul domaine du temps. Ces résultats ont des implications importantes pour les investisseurs. Le fort co-mouvement à une échelle de temps plus longue signifie qu'un investisseur ne serait pas en mesure de récolter en même temps les avantages de la diversification du portefeuille et la diversification du temps. Etant donné que le co-mouvement entre les marchés est instable, la construction d'un portefeuille diversifié serait donc difficile. Les investisseurs détenant des actifs et des instruments dérivés sur les marchés  $CO_2$ , du pétrole, du Gaz et du Charbon devraient surveiller ce qui se passe dans les autres marchés. Il est donc judicieux que les différents agents qui interviennent dans ces secteurs intègrent cette analyse dans leurs stratégies d'investissement.

# Conclusion générale et perspectives

Nous avons étudié dans cette recherche la relation du co-mouvement multi-échelle entre le prix du quota carbone (EUA) issu du Système Communautaire d'Échange de quota d'émission et le prix du crédit carbone (CER) issu du Mécanisme pour le développement propre (MDP). Nous l'avons complété par l'analyse de la relation multi-échelle entre le prix EUA et ceux du secteur de l'Énergie. Nous avons retenu comme méthodologie la transformée en ondelettes qui nous a permis de considérer que les agents pouvaient avoir un comportement d'investissement hétérogène. Notre procédure est différente des études réalisées jusqu'à ce jour qui considèrent une homogénéité des agents sur les marchés et qui conduit à des estimations de modèles qui reposent sur l'hypothèse ad hoc de la constance des coefficients estimés.

Les enjeux relatifs aux émissions des Gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère sont importants. Le principe de l'effet de serre permet de saisir le phénomène naturel du réchauffement climatique. L'analyse de l'impact de l'activité humaine montre le danger que court l'humanité si rien n'est fait pour réduire ces émissions. Les différentes conférences qui ont eu lieu depuis la création du marché carbone Européen permettent d'orienter les études économétriques que nous proposons dans cette thèse.

Notre étude porte sur une période de temps qui diffère de celle de la plupart des travaux économétriques. L'analyse réalisée par Chevallier (2010) par exemple, a décelé l'existence d'une causalité bi-directionnelle entre le prix EUA et le CER sur une période allant du 27 mars 2007 au 14 janvier 2010. Notre étude sur une période différente du 24 Mars 2008 au 19 Octobre 2012 indique une causalité uni-directionnelle allant du CER vers le EUA conforme aux faits observés de l'accélération du mécanisme pour le développement propre (MDP). La relation apparaît ainsi instable au cours du temps.

L'analyse multi-échelle de la relation entre l'EUA et le CER permet une distinction comportementale des agents sur ces marchés.

Nous détectons une causalité uni-directionnelle partant du marché des crédits vers celui des quotas carbone pour les opérateurs concernés par les bandes à hautes fréquences de trading. Pour les opérateurs qui par leur comportement occupent les moyens et long horizon de trading, il y'a l'existence d'une causalité bi-directionnelle. Les opérations spéculatives de l'EUA sur le SCEQE affectent donc les cours du CER sur le MDP et inversement. Ces résultats diffèrent de ceux obtenus par Chevallier (2010) et confirment l'instabilité des relations au cours du temps observée lorsqu'on utilise un même modèle sur les périodes différentes.

La vente en masse des permis de pollution par les entreprises des pays de l'annexe-B a en effet entraînée en contrepartie l'achat des crédits carbone issu du MDP. Cela s'est soldé par la baisse du prix CER qui a eu une répercussion directe sur celui du quota carbone sur différents horizons d'investissement. Cela s'est vérifié avec le VAR(1) qui a en effet montré l'existence de la relation d'interconnexion entre ces prix.

La prise en compte de la distinction comportementale des agents sur le marché carbone a permis d'apporter un nouveau regard sur cette relation.

Cette analyse du co-mouvement multi-échelle entre l'EUA et le CER va permettre aux agents intervenants sur ces marchés de pouvoir organiser différemment leurs stratégies d'investissement lors de la construction de leur portefeuille en intégrant les différents horizons.

Il en est de même de la relation entre le prix du quota carbone et ceux du secteur de l'énergie. Maria-mansanet et al (2010) ont, en effet, observé l'existence d'une causalité bi-directionnelle entre le prix du carbone et celui du Charbon, alors qu'elle est uni-directionnelle du prix du gaz vers celui du carbone sur la période de janvier 2008 à décembre 2009. Une même analyse sur une période différente (08 décembre 2008 au 19 octobre 2012) apporte d'autres résultats. Il en est ainsi de l'existence d'une causalité uni-directionnelle entre le prix du carbone celui du gaz et du charbon alors que le prix du pétrole cause celui du carbone.

Pour faire l'analyse de ces instabilités entre ces différents prix nous avons retenu l'hypothèse que les comportements des différents agents intervenants sur les marchés étaient hétérogènes et nous utilisons la relation multi-échelle entre le prix du quota carbone et ceux du secteur de l'énergie. Elle décèle une instabilité sur la causalité entre le marché du carbone et ceux du pétrole, du gaz et du charbon.

Afin de pouvoir être plus efficace dans la réduction des GES, il est important pour des industriels utilisant le pétrole, le gaz et le charbon de prendre en compte leur impact sur l'environnement. Ils peuvent ainsi intégrer dans leur analyse la structure multi-échelle du prix du quota carbone. Il est donc possible de construire des portefeuilles énergétiques en relation avec le marché du carbone en les diversifiant en tenant compte des différentes bandes de fréquences.

Cependant, avec le nombre croissant des agents sur le marché du carbone et l'accélération de l'activité commerciale, le prix au comptant de l'EUA continue de fluctuer, rendant ce marché plus risqué. Il est donc souhaitable dans les recherches futures d'étendre cette étude en analysant la gestion de risque des émetteurs sur le marché du carbone en raison de la forte volatilité.

L'entrée en vigueur du quota sur le marché européen du carbone, a conduit les agents impliqués dans ce marché à prendre en compte les coûts supplémentaires d'émissions de carbone dans les coûts de leurs entreprises de production. Dans le cadre de la politique Cap and Trade, sont échangés les permis à polluer entre les unités excédentaires et déficitaires, permettant aux participants du marché au comptant de se protéger face aux risques en utilisant les contrats à terme. Il est donc important d'examiner la relation de comouvement entre les prix spot et future du carbone sur différents horizons temporels. Dans ce cadre il faut calculer les ratios de couverture et étudier leur efficacité de couverture sur le marché du carbone en utilisant les différents modèles de couverture formés à l'aide d'une décomposition en ondelettes des séries chronologiques. Il est alors possible de calculer le ratio de couverture de minimum variance du marché du carbone pour divers horizons de couverture. L'étude pourra mesurer l'efficacité de la stratégie multi-échelle de couverture sur le marché carbone Européen en relation avec les marchés du secteurs de l'énergie ( pétrole, gaz et le charbon ).

# Bibliography

- [1] Abry, P., Grigoriadis, A. (1995) Designing multiresolution analysis type wavelets and their fast algorithms, *Journal of Fourier analysis and applications*, vol.2,n2
- [2] Abry,P.(1997) Ondelettes et turbulence Multiresolutions, algorithmes de décompositions, invariance d'échelle et signaux de pression, Diderot Editeur.
- [3] Abramovic,F. ,Bailey, T.C, Sapatinas, T.(2000) Wavelet analysis and its statistical applications, *The statistician*, vol.49,p1-29
- [4] Aguiar-Conraria,L.,Soares,M.J.(2007) Using cross-wavelets to decompose the time-frequency relation between oil and the macroeconomy Universidade do minho NIPE WP 16.
- [5] Ahamada,I.,Boutahar,M.(2002) Tests for covariance stationarity and white noise, with an application to Euro/US dollar exchange rate, an approach based on the evolutionary spectral density. *Economic Letters* 77,177-186.
- [6] Alberola, E. et Chevallier, J. 2009. European Carbon Prices and Banking Restrictions: Evidence from Phase I (2005-2007). *The Energy Journal* 30(3), 51-80.
- [7] Alberola, E., Chevallier, J., et Chèze, B., 2008. Price Drivers and Structural Breaks in European Carbon Prices 2005-2007. *Energy Policy* 36(2), 787-797.

- [8] Alberola, E., Chevallier, J. et Chèze, B. 2009a. The EU Emissions Trading Scheme: the Effects of Industrial Production and CO2 Emissions on European Carbon Prices. *Economie Internationale* 116, 93-126.
- [9] Alberola, E., Chevallier, J. et Chèze, B. 2009b. Emissions Compliances and Carbon Prices under the EU ETS: A Country Specific Analysis of Industrial Sectors. *Journal of Policy Modeling* 31(3), 446-462.
- [10] Alberola, E. et Chevallier, J. 2009. European Carbon Prices and Banking Restrictions:
- [11] A. Denny Ellerman , Franck J. Convery, Christian de perthuis ; LE PRIX DU CARBONE : les enseignements du marché européen du CO2 ,edition Pearson Education France, Paris 2010.
- [12] Aldroubi,A.,Unser ,M.(1993) Families of multiresolution and wavelet spaces with optimal properties, *Numer.Funct.Anal.and Optimiz.vol14,n56,p417-446.*
- [13] ALDY J., Stavins R. et alii (2007), *Architectures for Agreements: Addressing Global Change in the Post-Kyoto World*, Cambridge University Press.
- [14] ALDY J., Stavins R. et alii (2008), *Designing the Post-Kyoto Climate Regime: Lessons from the Havard Project on international Climate Agreement. An Interim Progress Report for the 14<sup>th</sup> Conference of the Parties*, Poznan.
- [15] Alexander, C. (1998) *Value at Risk,Risk Management and Analysis.Vol.1: Measuring and Modeling Financial Risk* ,pp.125-171.John WileySons Ltd,UK.
- [16] Alexander, C. (2001): *Market models: A Guide to Financial Data Analysis* .John Wiley Sons LTD

- [17] AMBROISI P., CAPPOR K., (2009), State and Trends of the Carbon Markets 2009, Banque mondiale.
- [18] AMBROISI P., Kossoy A., (2010), State and Trends of the Carbon Markets 2010, Banque mondiale.
- [19] AMBROISI P., Kossoy A., (2011), Linacre N., State and Trends of the Carbon Markets 2011, Banque mondiale.
- [20] ANDERSON j., MORGENSTERN R.D., TOMAN M., (1999) : The Economics of when flexibility in the Design of Greenhouse Gas Abatement Policies, Annual Review of Energy and the Environment 24, 431-60.
- [21] Anger, N. (2008) Emissions trading beyond Europe: Linking schemes in a post-Kyoto world. *Energy Economics* 30: 2028-2049.
- [22] Anger, N., Bohringer, C. Moslener, U. (2007) Macroeconomic impacts of the CDM: The role of investment barriers and regulations. ZEW discussion paper No. 07-026 Mannheim.
- [23] Antonio Ria (2010): Measuring comovement in the time-frequency space, *Journal of Macroeconomics* (**32**), 685-691.
- [24] Antoniadis,A.(1997) Wavelets in statistics; a review *J.Ital.Statist.Soc.*,No 6,p.97-144,
- [25] Antoniadis,A. Oppenheimer,G.(1995) Wavelets and statistics, Springer Verlag, Lecture Notes in statistics ,No 103,1995
- [26] Antoniadis,A., Bigot,J., Sapatinas,T.(2001) Wavelet estimators in non-parametric regression : a comparative simulation study,*Journal of statistical software*,vol.6, No 6,p.1-83

- [27] Arino, M.A. (1998) Forecasting times series via discrete wavelet transform unpublished manuscript
- [28] Artis,M.J., Bladen-Hovell,R., Nachane,D.M(1992) Instability of the velocity of money: a new approach based on the evolutionary spectrum, CEPR discussion paper No 735.
- [29] Artzner, P.,F.Delbaen, J.Eber, and D.Heat (1999): Coherent Measures of Risk. Mathematical Finance No9 , pp 203-228.
- [30] Artzner, P.,F.Delbaen, J.Eber,and D.Heat(1997) Thinking Coherently Risk, Vol10, No 11, 68-71
- [31] Aussem, A.J., Murtagh,F.(1997) Combining neural network forecasts on wavelet-transformed time series, connection science 9(1):113-21.
- [32] Bai,J. and Perron,P.(2003) Computation and analysis of multiple structural change models,Journal of Applied Econometrics,18,1-22.
- [33] Balkema, A.A.,de Haan,L.(1974) Residual lifetime at great age. Annals of Probability, 2,792- 804.
- [34] Barlett,M.S.(1950) Periodograms analysis and continous spectra, Biometrika, v.37, p.1-16
- [35] BELLASSEN V., CRASSOUS R., DIETZCH L. et SCHWARTZMAN S. (2008): Réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts: quelle contribution de la part des marchés du carbone?, Etude climat n12, Caisse des dépôts, Mission climat.
- [36] Benz, E. Truck, S. (2009) Modelling the price dynamic of CO2 emission allowances. Energy Economics 31(1): 4-15.
- [37] Berndt, E.K., Robert, E.,Hall, B.H., Hausman, J.A. 1974. Estimation and Inference in Nonlinear Structural Models.

- [38] Bernardini, R., Kovacevic, J. 1996. Local orthogonal bases II: window design. *Multidimensional systems and signal processing* 7, 371-399.
- [39] Betz, R., Rogge, K. Schleich, J. (2006) EU emissions trading: An early analysis of national allocation plans for 2008-2012. *Climate Policy* 6: 361-94.
- [40] Breitung, J., Candelon, B. (2006): Testing for short and long-run causality: A frequency domain approach. *Journal of Econometrics* (**132**), 363-378.
- [41] Bollerserv,T(1986) Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity, *Journal of econometrics*31:307-327.
- [42] Bollerserv,T(1987) A conditional Heteroskedastic Time Series Models for Speculative Prices and Rate of Retrurns, *The Review of Economics and Statistics* 31,pp.307-327.
- [43] Bollerserv,T., R.F.Engle and Nelson,D.(1994) ARCH models, Ch49 in R.F.Engle and D.L.McFadden eds. *Handbook of econometrics* Elsevier.
- [44] Bollerserv,T..Wooldridge,J.M.(1992) Quasi-Maximum Likelihood Estimation and Inference in Dynamics Models with Time Varying Covariance , *Econometric Reviews*11:143-172.
- [45] Bourbonnais, R. et Terraza, M. (2008) *Analyse des séries temporelles en économie*. Collection Dunod.
- [46] Box,G.E.P. et Jenkins,G.M.(1970) *Time series analysis, Forecasting and Control*. San Francisco, Holden Day.
- [47] Box,G.E.P. et Pierce, D.A.(1970),Distribution of Residual Autocorrelation in ARIMA Time series Models , *Journal of the American Statistical Association*,65,1509-1526.

- [48] Brock,W.A., Hommes,C.H.(1997) A Rationale Route to Randomness  
Econometrica ,vol.65,pp;1059-1095.
- [49] Brock,W.A.,Dechert W.D et Scheinkman J.A(1987) A Test for Independence Based on the Correlation Dimension; Working paper,University of Wisconsin.
- [50] BURNIAUX, J.-M., CHATEAU, J., DELLINK, R.,DUVAL, R., JAMET, S., (2009), The Economics of climate Change Mitigation: How to Build the Necessary Global Action in a cost-Effective Manner, Paris: OECD.
- [51] Bunn, D., et Fezzi, C., 2007. Interaction of European Carbon Trading and Energy Prices. Fondazione Eni Enrico Mattei, Document de Travail 123.
- [52] Chang,S.G.,Yu, B.Vetterli,M.(2000) Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression,IEEE Trans.Image Proc.,vol.9,pp.1532-1546
- [53] Chevallier, J. 2009. Carbon futures and macroeconomic risk factors: A view from the EU ETS. Energy Economics 31(4), 614-625.
- [54] Chevallier, J., Ielpo, F. et Mercier, L. 2009a. Risk Aversion and Institutional Information Disclosure on the European Carbon Market: a Case-Study of the 2006 Compliance Event. Energy Policy 37(1), 15-28.
- [55] Chevallier, J., Le Pen, Y., et Sévi, B., 2009b. Options Introduction and Volatility in the EU ETS, Document de Travail EconomiX, à paraître
- [56] Chevallier, J., (2010):Carbon Prices during the EU ETS Phase II: Dynamics and Volume Analysis, Working paper HAL-SHS-00459140, Université Paris Dauphine.

- [57] Chevallier, J. 2010. EUAs and CERs: Vector Autoregression, Impulse Response Function and Cointegration Analysis. *Economics Bulletin* 30(1), 558-576.
- [58] Chevallier, J. 2011a. The European Carbon Market (2005-2007): Banking, Pricing and Risk-Hedging Strategies. in *Handbook of Sustainable Energy*, Chapter 19, edited by Galarraga, I., Gonzalez-Eguino, M., Markandya, A. Edward Elgar
- [59] Chevallier, J. 2011b. The Clean Development Mechanism: A Stepping Stone Towards World Carbon Markets? in *Handbook of Sustainable Energy*, Chapter 20, edited by Galarraga, I., Gonzalez-Eguino, M., Markandya, A. Edward Elgar
- [60] Christian de Perthuis; *ET POUR QUELQUES DEGRES DE PLUS ... changement climatique : incertitudes et choix économiques* . Edition Pearson Education France 2010.
- [61] Cromwell, J., Labys, W.C., Terraza, M. (1994a) *Univariate tests for time series models*. Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- [62] Coase, R., (1960), *The problem of Social Cost*, *Journal of Law and Economics*.
- [63] Coifman, R.R., Wickerhauser, M.V. 1992. Entropy-based algorithms for best-basis selection. *IEEE Transactions on Information Theory* 38, 713-718.
- [64] Convery, F. J. (2009) Reflections the emerging literature on emissions trading in Europe. *Review of Environmental Economics and Policy* 3(1): 121-137.
- [65] Convery F., Ellerman D., De Perthuis C. (2008), *Le marché européen du carbone en action : enseignements de la première phase*, APREC

- [66] CORFEE-MORLOT, J., GUAY, B., LARSEN, K.M.,(2009), Financing Climate Change mitigation : Towards a framework for Measurement, Reporting and Verification, Paris : OECD.
- [67] Criqui, P. Kitous, A. (2003) Impacts of linking JI and CDM credits to the EU ETS. Kyoto Protocol Implementation, KPI, Technical Report, B4-3040/2001/330760/MAR/E1.
- [68] Cromwell J.B., Hannan M.J., Labys W.C., Terraza M. (1994), Multi-variate tests for time series models, Sage Publications.
- [69] Croux, C., Forni, M., Reichlin, L. (2001): An Alternative definition of economic regions in the United States based on similarities in state business cycles. *Review of Economics and Statistics* (**87**), 617–626.
- [70] Crowley, P. (2007).A guide to wavelets for economists. *Journal of Economic Surveys*, (21), 207-264.
- [71] Dasgupta, S., Laplante B., Meisner C., Wheeler D., et Yan J., (2009), The Impact of sea Level Rise on Developing Countries: A Comparative Analysis, *Climatic Change* 93 (3-4): 379-88.
- [72] Daubechies I. (1990), Orthonormal basis of compactly supported wavelets, *Communications on Pure and Applied Math.*, 49, 906-99
- [73] Daubechies. I (1992), Ten lectures on wavelets, CBMS-NSF conference series in applied mathematics, SIAM Ed.
- [74] Danielsson,J. C.de Vries(1997)Tail index and quantile estimation with very high frequency data, *Journal of Empirical finance*,4,241-257.
- [75] Danielsson,J. C.de Vries (1998):Beyond the Sample :Extreme Quantile and Probability Estimation ,London School of Economics, Discussion Paper 298.

- [76] De Gouvello C., Félix B., (2008), Low-Carbon Energy Projects for Development in Sub-Sahara Africa, World Bank Working paper.
- [77] Delarue, E.D. et D'haeseleer, W.D., 2007. Price determination of ETS allowances through the switching level of coal and gas in the power sector. *International Journal of Energy Research* 31, 1001-1015.
- [78] Delong, J.B., Shleifer, A., Summers, L.H., Waldman, R.J. (1990) Positive feedback investment strategies and descriptive and destabilizing rational speculation *The Journal of Finance* 45, 2, 379-395
- [79] De Perthuis C. (2009), *Et pour quelques degrés de plus* Nos choix économiques face au risque climatique, Pearson.
- [80] De Perthuis C (2008), *EU Carbon Trading : Five Lessons from the pilot phase (2005, 2007)*, Université Paris Dauphine.
- [81] DELBOSC A., STEPHAN N., BELLASEN V., CORMIER A., LEGUET B., (2011), *Assessment of Supply and Demand for carbon Offsetst*, CDC Mission climat
- [82] Delbosc A. et alii (2008), *Repère CO2 et Énergie*, Mission climat de la caisse des d'Ép'ets et MEEDDAT.
- [83] De S'pibus J., (2007), *Scarcity and Allocation of Allowances in the EU Emissions Trading Scheme - A Legal Analysis*, NCCR Trade Regulation Working Paper No 2007/32, available on the internet at <http://ssrn.com/abstract=1088726>.
- [84] Dickey, D.A., Fuller, W.A. 1979. Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series with a Unit Root. *Journal of the American Statistical Association* (74), 427-431.
- [85] Dickey, D.A., Fuller, W.A. 1981. Likelihood Ratio Statistics for Autoregressive Time Series with a Unit Root. *Econometrica* (49), 1057-1072.

- [86] Diebold,F., T.Schuerman, J.Stroughair (1999) Pitfalls and opportunities in the Use of Extreme Value Theory in Risk Management.in Advances in Computational Finance, Kluwer Academic Publishers, Amsterdam.
- [87] Ding,Z.,Granger,C.W.,Engle,R.(1993) A long memory property of stock markets returns and a new model. Journal of Empirical finance1, 83-106.
- [88] Donoho,D.L.(1995) Denoising by soft thresholding, IEEE Trans on Inf.theory,vol.41,n<sup>o</sup>3,p.613-627
- [89] Donoho,D.L., Johnstone,I.M.(1994) Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage, Biometrica, vol.81,p.425-455
- [90] Donoho,D.L., Johnstone,I.M.,(1995) Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage, Journal of American Stat.Assoc.,vol.90,no.432,pp.1200-1124
- [91] Donoho,D.L.,Johnstone,I.M,Kerkyacharian.G,Picard.D(1995) Wavelet shrinkage:Asymptotia, JRSS,ser.B,vol.57,n<sup>o</sup>2,p301-369
- [92] Down,K(1998).Beyond Value at Risk :The new science of risk management. John WileySons,Chichester.
- [93] Dubman,M.R.(1965)Spectral Characterization and Comparison of Non stationary Processes, unpublished manuscript.
- [94] Dufrenot,G.,Marimoutou,V.,Peguin-Feissolle, A. (2004) Modelling the volatility of the US SP500 index using an LSTGARCH model , Revue d'Economie Politique,114,4,453-465.
- [95] Dufrenot,G., Guegan,D., Peguin-Feissolle, A. (2005) Modelling squared returns using a SETAR model with long memory dynamics, Economic letters,86,2,237-243

- [96] Dufrenot,G., Guegan,D., Peguin-Feissolle, A. (2005) Long memory dynamics in a SETAR model, Application to stock markets, Journal of International Financial Markets, Institutions Money,15,5,391-406
- [97] Dufrenot,G , Guegan,D , Peguin-Feissolle, A (2008) Changing regime volatility :a fractionally integrated SETAR MODEL, Université Paris1Panthéon Sorbonne
- [98] Ellerman D. (2008), The EU Emission Trading Scheme: Prototype of a Global System ?, Discussion Paper 2008-02, Harvard Project on International Climate Agreements.
- [99] Ellerman, D., Convery, F., De Perthuis, C. 2010. Pricing Carbon: The European Union Emissions Trading Scheme. Cambridge University Press.
- [100] Ellerman, A. Denny, and Paul L. Joskow, (2008), the European Union's Emission Trading System in Perspective, Pew Center for Global Climate Change.
- [101] Ellerman, A.D., et 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 41, 267-287.
- [102] Ellerman, A.D., et Feilhauer, S. 2008. A Top-down and Bottom-up Look at Emissions Abatement in Germany in Response to the EU ETS. MIT CEEPR Working Paper 2008-017.
- [103] Ellerman, A.D., Parsons, J. 2006. Shortage, Inter-period Pricing, and Banking. Tendances Carbone, Volume 5.
- [104] Ellerman, A.D., Joskow, P.L., Schmalensee, R., Montero, J.P., Bailey, E. 2000. Markets for Clean Air: The US Acid Rain Program. 2nd edn. Cambridge University Press

- [105] Engle, R.F., 2002. Dynamic Conditional Correlation: A Simple Class of Multivariate Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity Models. *Journal of Business and Economic Statistics* 20, 339-350.
- [106] Engle, R.F. 2009. *Anticipating Correlations: A New Paradigm for Risk Management*. Princeton University Press.
- [107] Engle, R.F., and Sheppard, K., 2001. Theoretical and Empirical Properties of Dynamic Conditional Correlation Multivariate GARCH. NBER Working Paper 8554.
- [108] European commission, (2007), *Limiting Global Climate Change to 2 Degrees Celsius - The Way Ahead for 2020 and beyond : Impact Assessment Summary*, Commission Staff Working Document, Brussels.
- [109] European Commission. 2009. Fight against tax fraud: Commission proposes measures for a consistent response to carousel fraud in certain sectors. IP/09/1376 available at <http://europa.eu/>
- [110] Figueres, C., Streck C., (2009), *Enhanced Financial Mechanisms for Post 2012 Mitigation*, Background Paper to the 2010 World Development Report, Policy research Working paper 5008.
- [111] Francq, C., Zakoian, J.M. 2010. *GARCH Models: Structure, Statistical Inference and Financial Applications*. Wiley.
- [112] Franses, P., Van Dijk, D. 2000. *Non-linear time series models in empirical finance*. Cambridge University Press
- [113] Gabbanini, F., Vannucci, M., Bartoli, G., Moro, A. 2004. Wavelet packet methods for the analysis of variance of time series with applications to crack widths on the Brunelleschi dome. *Journal of Computational and Graphical Statistics* 13, 639-658.

- [114] Geronimo, J.S., Hardin, D.P., Massopust, P.R. 1994. Fractal functions and wavelet expansions based on several scaling functions. *Journal of Approximation Theory* 78, 373-401.
- [115] Gençay,R., Selcuk,F.,et Ulugulyagci,A.(2002): High volatility,thick tails and extreme value theory in value at risk estimation.Manuscript, Department of Economics, Bilkent University.
- [116] Gençay,R., Whitcher,B., Selcuk,F.(2002) Multiscale systematic risk, National center of competence in research financial valuation and risk management, Working Paper n°43
- [117] Gençay, R. et Selçuk, F.(2003) : Extreme value theory and value at risk :relative performance in emerging markets.National center of competence in research financial valuation and risk management, working paper N°42.
- [118] Gençay,R., Selcuk,F.(2004) Asymmetry of information flow between volatilities across time scales N°90, Economic society 2004,NorthAmericas Winter Meeting.
- [119] Gençay,R., Selcuk,F., Whitcher,B.(2003) An introduction to wavelets and other filtering methods in Finance and Economics, Academic Press, San Diego.
- [120] Godard, O., (2008), Unilateral European Post-kyoto Climate Policy and Economic Adjustment at EU Borders, Ecole Polytechnique, Chaire développement durable.
- [121] Haites, E., Margaree Consultants, (2008), Investments and Financial flows Needed to Address Climate Change, The Climate Group, [www.breakingtheclimatedeadlock.com](http://www.breakingtheclimatedeadlock.com).

- [122] Helfand, G.E., Moore, M.R., Liu, Y. 2006. Testing for dynamic efficiency of the Sulfur Dioxide Allowance Market. Working Paper, University of Michigan.
- [123] Hess-Nielsen, N., Wickerhauser, M.V. 1996. Wavelets and time-frequency analysis. *Proceedings of the IEEE* 84, 523-540.
- [124] Hintermann, B. 2010. Allowance Price Drivers in the First Phase of the EU ETS. *Journal of Environmental Economics and Management* 59(1), 43-56.
- [125] Hamburger, Y (2003) Wavelet based Value at Risk Estimation: A Multiresolution Approach, Master's thesis Dept. of Informatics and Economics, Erasmus University.
- [126] Hardle, W., Kerkycharian, G., Picard, D., Tsybakov, A. (1998) Wavelet approximations and statistical applications, lecture note in statistics, No 129, Springer Verlag, 1998.
- [127] Hunt, K., Nason, G.P. 2001. Wind speed modelling and short-term prediction using wavelets. *Wind Engineering* 25, 55-61.
- [128] IPCC (2005). IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos and L. Meyer. Cambridge, UK, New York, NY: 105-178.
- [129] IPCC (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [130] Jean-Pierre Hansen et Jacques Percebois ; ENERGIE : Economie et Politiques; édition De Boeck Université , novembre 2010.

- [131] Johansen, S. 1988. Statistical analysis of cointegration vectors. *Journal of Economic Dynamics and Control* (**12(2-3)**), 231-254.
- [132] Johansen, 1991, Estimation and Hypothesis Testing of Cointegration Vectors in Gaussian Vector Autoregressive Models, *Econometrica*, Vol. 59, No. 6, pp. 1551-1580.
- [133] Johansen, 1995, Likelihood-Based Inference in Cointegrated Vector Autoregressive Models (New York: Oxford University Press).
- [134] Julien Chevallier, 2010. EUAs and CERs: Vector Autoregression, Impulse Response Function and Cointegration Analysis, *Economics Bulletin*, AccessEcon, vol. 30(1), pages 558-576.
- [135] Klepper, G. Peterson, S. (2006) Emissions trading, CDM, JI, and more: the climate strategy of the EU. *The Energy Journal* 27(2): 1-26.
- [136] Kim, S., In, F. (2005): The relationship between stock returns and inflation: new evidence from wavelet analysis. *Journal of Empirical Finance* (**12**), 435-444.
- [137] Kling, C., Rubin, J. 1997. Bankable Permits for the Control of Environmental Pollution. *Journal of Public Economics*, 64, 101-115.
- [138] Kronenberg, T. 2006. Should we worry about the failure of the Hotelling rule? Working Paper, Maastricht University.
- [139] Kyrtsov, C., Labys, W., Terraza, M. (2001) Noisy chaotic Dynamics in commodities markets, *Empirical Economics*, vol. 29, No. 3, pp. 489-502.
- [140] Kyrtsov, C., Labys, W. C., Terraza, M. (2002) Stochastic Chaos or ARCH Effects in Stock Series. A Comparative Study, *International Review of Financial Analysis*, Vol. 11, pp. 407-431.

- [141] Kyrtsou,C.,Terraza,V.(2004).Value at Risk, Outliers and Chaotic Dynamics, Université du Luxembourg Working paper No 04-8.
- [142] Kyrtsou,C(2002) Hétérogénéité et chaos stochastique dans les marchés financiers. Thèse de Doctorat de l'Université Montpellier1
- [143] Lee, J. 2005. Estimating memory parameter in the US inflation rate. *Economics Letters* 87(2), 207-210.
- [144] Lee, J., Strazicich, M.C. 2001. Testing the Null of Stationarity in the Presence of a Structural Break. *Applied Economics Letters*, 8, 377â382.
- [145] Liski, M., Montero, J.P. 2006. On Pollution Permit Banking and Market Power. *Journal of Regulatory Economics*, 29(3), 283â302
- [146] Lemmens, A., Croux, C., Dekimpe, M. (2008): Measuring and testing Granger causality over the spectrum: An application to European production expectation surveys. *International Journal of Forecasting* (24), 435-444.
- [147] Lutkepohl, H. & Kratzig, M. (2004) *Applied time series econometrics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [148] Mallat S. (1989), A theory for multiresolution signal decomposition, the wavelet representation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11, p.674-693.
- [149] Mansanet-Bataller, M., Chevallier, J., Herve-Mignucci, M., Alberola, E. 2011. EUA and sCER Phase II Price Drivers: Unveiling the reasons for the existence of the EUA-sCER spread. *Energy Policy*, forthcoming.
- [150] Mansanet-Bataller, M., Pardo, A., et Valor, E., 2007. CO2 Prices, Energy and Weather. *The Energy Journal* 28 (3), 67-86.
- [151] Nason, G.P. 2008. *Wavelet Methods in Statistics* with R. Springer.

- [152] Nason, G.P., Sapatinas, T., Sawczenko, A. 2001. Wavelet packet modelling of infant sleep state using heart rate data. *Sankhya B* 63, 199-217.
- [153] Nsouadi and al (2015) Analyse temps-fréquence du co-mouvement entre le marché européen du  $CO_2$  et les autres marchés de l'énergie (Working paper du cahier du Lameta) et a été présenté à la conférence de Toronto (31st International Business Research Conference 27-29 july 2015, Ryerson University, Toronto, Canada).
- [154] Ombao, H., von Sachs, R., Guo, W.S. 2005. SLEX analysis of multivariate nonstationary time series. *Journal of the American Statistical Association* 100, 519-531.
- [155] Ombao, H.C., Raz, J., von Sachs, R., Malow, B.A. 2001. Automatic statistical analysis of bivariate nonstationary time series. *Journal of the American Statistical Association* 96, 543-560
- [156] Ombao, H.C., Raz, J., von Sachs, R., Guo, W. 2002. The SLEX model of non-stationary random processes. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics* 54, 171-20
- [157] Percival, D.B., Walden, A.T. 2000. *Wavelet Methods for Time Series Analysis*. Cambridge University Press.
- [158] Perron, P. 1989. The Great Crash, the Oil Price Shock, and the Unit Root Hypothesis. *Econometrica*, 57(6), 1361-1401.
- [159] Pindyck, R.S. 1993. the Present Value Model of Rational Commodity Pricing. *the Economic Journal*, 103, 511-530.
- [160] Ramsey J.B., Lampart C. (1998), Decomposition of Economic Relationships by Timescale Using Wavelets, *Macroeconomic Dynamics*, 2(1), p.49-71.

- [161] Rao, A. B. and Rubin, E. S. (2006). Evaluation of potential cost reduction from improved aminebased CO<sub>2</sub> capture systems. *Energy Policy* 34, 3765-3772.
- [162] REVUE D'ECONOMIE FINANCIERE : LA FINANCE CARBONE ,revue Trimestrielle de l'association d'économie financière Numero 83 Mars 2006.
- [163] Rubin, J. 1996. A model of Intertemporal Emission Trading, Banking, and Borrowing. *Journal of Environmental Economics and Management*, 31, 269-286.
- [164] Sadefo, J. and al (2015), Time-Frequency Analysis of the relationship Between EUA and CER Carbon Markets; *Environ Model Assess*, volume 21, Issue 2, pp 279-289.
- [165] Sandrine Lardic et Valérie Mignon (2002): *Economtrie des séries temporelles macroéconomiques et financières, (édition ECONOMICA )*, paris 2002.
- [166] Strang, G., Strela, V. 1994. Orthogonal multiwavelets with vanishing moments. *Optical Engineering* 33, 2104-2107.
- [167] Strang, G., Strela, V. 1995. Short wavelets and matrix dilation equations. *IEEE Transactions on Signal Processing* 43, 108-115.
- [168] Strela, V., Heller, P.N., Strang, G., Topiwala, P., Heil, C. 1999. The application of multiwavelet filterbanks to image processing. *IEEE Transactions on Image Processing* 8, 548-563.
- [169] 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.

- [170] Schleich, J., Ehrhart, K.M., Hoppe, C., Seifert, S. 2006. Banning Banking in EU Emissions Trading? *Energy Policy*, 112â120.
- [171] Slade, M.E., Thille, E. 1997. Hotelling Confronts CAPM: A Test of the Theory of Exhaustible Resources. *The Canadian Journal of Economics*, 30(3), 685â708.
- [172] Trotignon, R., et McGuinness, M., 2007. Technical Memorandum on Analysis of the EU ETS Using the Community Independent Transaction Log. MIT-CEEPR Working Paper 2007-012.
- [173] Trotignon, R., McGuinness, M., et Delbosc, A., 2008. European CO2 Market and the CITL: The Trial Period Under Scrutiny. Research Report Mission Climat, Caisse des DÃ©pÃ´t, Paris.
- [174] World Bank, 2010. State and Trends of the Carbon Market 2010. Edited by Kossoy, A. and Ambrosi, P. Environment Department, Carbon Finance at the World Bank, Washington DC, USA.
- [175] Wickerhauser, M.V. 1994. Adapted Wavelet Analysis from Theory to Software. A.K. Peters.
- [176] Wu, H. 2006. Wavelet Estimation of Time Series Regression with Long Memory Processes. *Economics Bulletin* 3(33), 1-10.
- [177] Xia, X.G., Geronimo, J., Hardin, D., Suter, B. 1996. Design of prefilters for discrete multiwavelet transforms. *IEEE Transactions on Signal Processing* 44, 25-35.
- [178] Yogo, M. 2008. Measuring business cycles: A wavelet analysis of economic time series. *Economics Letters* 100(2), 208-212.

# Appendix A

## Annexe

### A.1 Annexe du chapitre 2

#### A.1.1 Test de la Trace du modèle des bandes à basse fréquences

•  
Pour effectuer le test de la trace, il est nécessaire de préciser d'abord les spécifications à retenir :

- Absence ou présence de constante dans le modèle VECM.
- Absence ou présence de constante et de tendance dans les relations de cointégration.

Le test de la trace va s'effectuer en supposant :

## A.1 Annexe du chapitre 2

- L'existence d'une constante dans la relation de long terme et non dans les données (pas de constante dans le modèle à correction d'erreur).
  
- L'existence d'une constante dans la relation de long terme et aussi dans les données (présence d'une constante dans le modèle à correction d'erreur).
  
- Constante dans la relation de cointégration mais pas dans le modèle VECM.

Table A.1: Test de cointégration de la trace

hypothèse	Trace-Statistique	Valeur Critique	Prob
Absence de Cointégration	13.9799	20.2618	0.2908
Il y a au plus 1 relation de cointégration	3.6264	9.1645	0.4706

Le test de la trace accepte l'hypothèse nulle d'absence de cointégration ( $13.9799 < 20.2618$ ) au seuil statistique de 5% dans le cas où il existe une constante dans la relation de cointégration mais pas dans le modèle VECM.

- Constante dans la relation de cointégration et dans le modèle VECM.

Table A.2: Test de cointégration de la trace

hypothèse	Trace-Statistique	Valeur Critique	Prob
Absence de Cointégration	12.2169	15.4947	0.1468
Il y a au plus 1 relation de cointégration	2.0855	3.8414	0.1487

## ANNEXE

Il y a absence de cointégration car l'hypothèse nulle d'absence de cointégration a été acceptée ( $12.2169 < 15.4947$ )

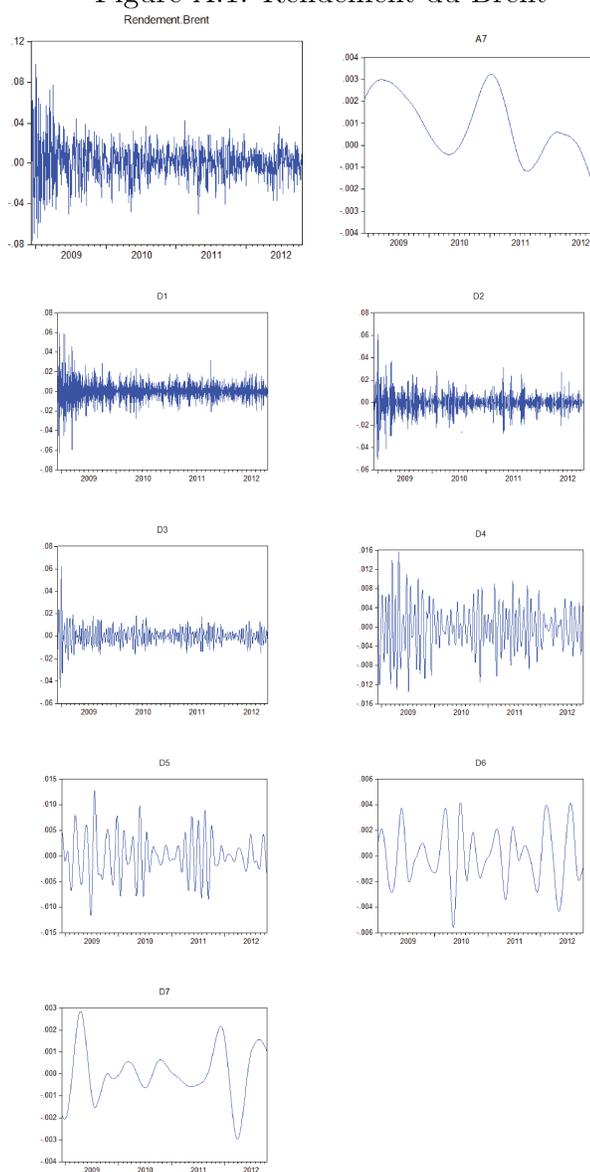
## A.A.2 Annexe du chapitre 3

### A.2 Annexe du chapitre 3

#### A.2.1 Rendement

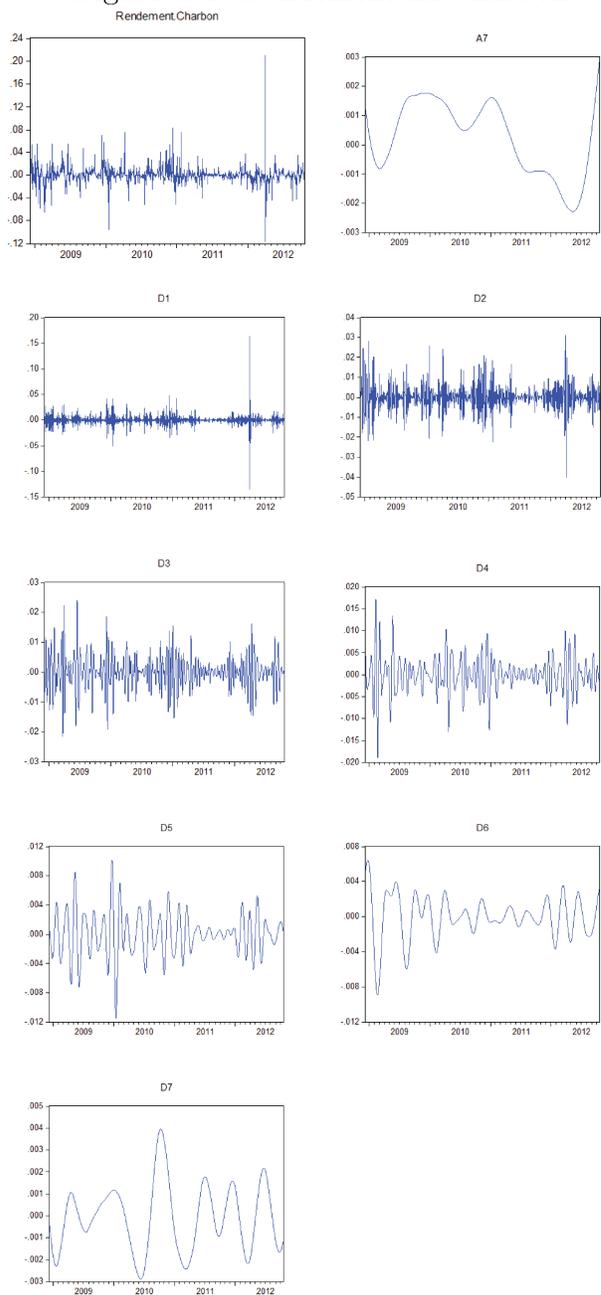
# ANNEXE

## Figure A.1: Rendement du Brent



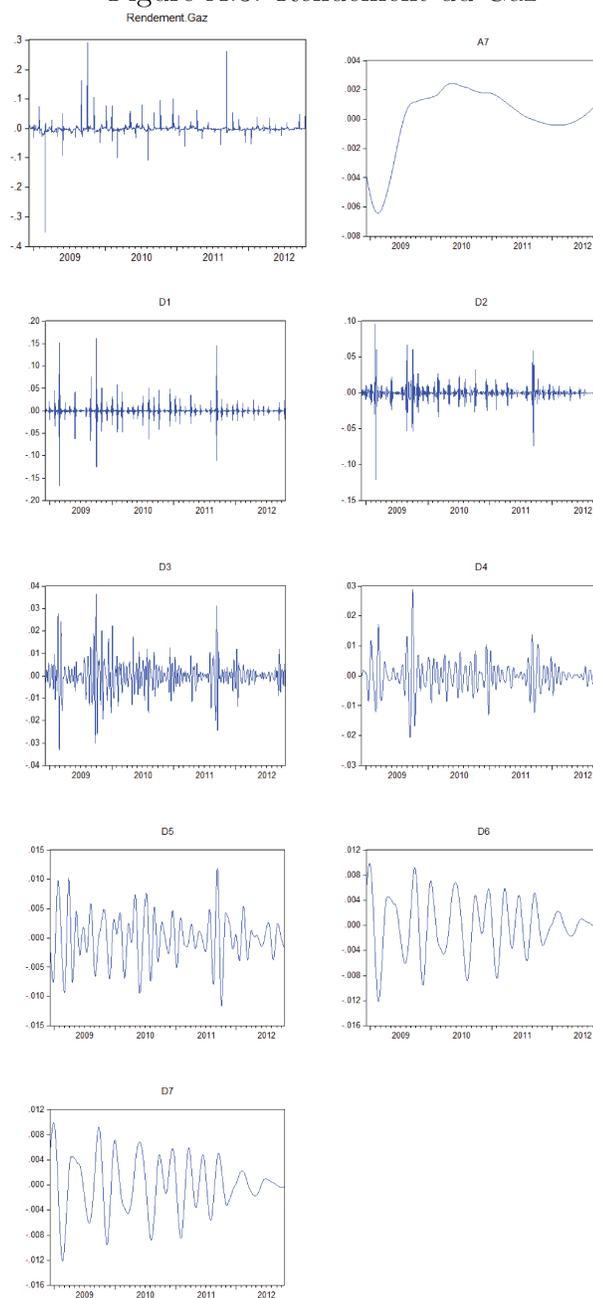
## A.A.2 Annexe du chapitre 3

Figure A.2: Rendement du Charbon



# ANNEXE

## Figure A.3: Rendement du Gaz



# List of Figures

# List of Tables

# Contents

**VU et PERMIS D'IMPRIMER**



A Montpellier, le

Le Président de l'Université de Montpellier

**Philippe Augé**