

**Louvain School of Management**

# **Marché du carbone européen et prix du carbone**

Analyse économétrique

Auteur : Jacques Benoît  
Promoteur : Hasse Jean-Baptiste  
Année académique 2022-2023  
Travail de fin d'études (TFE) en vue d'obtenir le titre de  
Master (60) en Sciences de Gestion  
Horaire de jour

## **Remerciement**

Ce mémoire n'aurait pas été le même sans l'aide précieuse de certaines personnes. Dans un premier temps, je souhaite remercier chaleureusement Monsieur Jean-Baptiste Hasse pour son aide sans faille. Sans ses explications, ses conseils et sa grande disponibilité, ce mémoire ne serait pas le même. Ensuite, je souhaite remercier mon entourage, amis, famille pour leur soutien et avis critiques qui ont contribué à améliorer la qualité de ce travail.

# Table des matières

Chapitre 1 - Introduction .....	5
Chapitre 2 - Marché Européen du Carbone.....	7
2.1 Fonctionnement général .....	8
2.2 Évolutions.....	11
Phase 1 (2005 - 2007).....	11
Phase 2 (2008 - 2012).....	12
Phase 3 (2013 - 2020).....	13
Phase 4 (2021 - 2030).....	14
Chapitre 3 – Résultats et discussion.....	16
3.1 Données .....	16
3.2 Rupture Structurelle .....	17
Interprétation .....	19
3.3 Causalité de Granger .....	21
Interprétation .....	23
Chapitre 4 - Conclusion.....	25
Annexe .....	26
A. Code pour ruptures structurelles.....	26
B. Code pour causalité prédictive de Granger.....	27
C. Contenu additionnel.....	30
Bibliographie.....	31

## Liste des figures

Figure 1: Les marchés du carbone dans le monde .....	8
Figure 2: Allocations gratuite, vendues aux enchères et émissions réelles.....	10
Figure 3 : Evènements majeurs du SEQE-UE entre 2005 et 2022.....	11
Figure 4: Surplus de quotas cumulés entre 2005 et 2020.....	13
Figure 5 : Prix journalier du CO2 entre janvier 2006 et décembre 2022. ....	16
Figure 6 : Prix du quota entre 2006 et 2022 et points de rupture.....	20
Figure 7 : Illustration du principe de causalité de Granger. ....	21
Figure 8 : Résultats du critère d'information AIC pour différents ordres de VAR. ....	22
Figure 9 : Test de causalité de Granger dans le domaine fréquentiel (phase 4).....	24
Figure 10: Test de causalité de Granger dans le domaine fréquentiel (phase 2).....	30
Figure 11: Test de causalité de Granger dans le domaine fréquentiel (phase 3).....	30

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Analyse préliminaire sur l'évolution du prix du CO2 .....	17
Tableau 2: Données caractérisant les 6 périodes définies par les points de rupture .....	19
Tableau 3 : Résultat du test de causalité de Granger.....	23
Tableau 4 : Résultats du test de causalité de Granger pour différents ordres n .....	24

# Chapitre 1 - Introduction

Dans son dernier rapport, le Groupe International d'Expert sur le Climat (GIEC) affirme : « Les activités humaines, principalement par le biais d'émissions de gaz à effet de serre, ont sans équivoque provoqué le réchauffement de la planète » (IPCC, 2022). Afin de limiter ce réchauffement à 1.5 °C, conformément aux accords de Paris, une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre est nécessaire. Cette transition demande une profonde remise en question de nos systèmes de production, transport et consommation d'énergie. Individuellement, cela implique de modifier nos habitudes de vie en passant, entre autres, par plus de sobriété. Collectivement, il est nécessaire pour les gouvernements d'encadrer cette mutation par le déploiement d'actions systémiques concrètes. Le changement climatique étant un problème global, la mise en place de politiques multinationales coopérative est essentielle (Nordhaus, 2019).

En 1997, lors de la troisième conférence des parties (COP 3), le protocole de Kyoto est signé par 37 pays de l'ONU. Cet accord international vise à limiter les émissions des pays signataires par la fixation de quotas d'émissions individuels avec pour objectif une réduction, entre 2008 et 2012, d'au moins 5% par rapport à 1990. Afin de faciliter la réalisation de ces objectifs ambitieux, plusieurs mécanismes de flexibilités sont mis en place dont, notamment, le mécanisme des permis négociables. Ce dernier a pour but de rendre la décarbonisation économiquement efficace en encourageant la réduction d'émissions là où elle est la moins coûteuse. Pour cela, les pays peuvent échanger leurs quotas entre eux formant ainsi un marché du carbone. Les pays de l'union européenne se partagent alors un objectif de réduction de 8%.

Durant les négociations du protocole, l'union européenne avait d'abord marqué une forte opposition à l'application d'un marché d'émissions. Par la suite, cette résistance s'est estompée et a mené à la mise en place du Système d'Échange de Quotas d'Émissions de l'Union Européenne (SEQE-UE) (Ellerman & Buchner, 2007). Si le SEQE-UE a d'abord été mis en place dans l'idée d'assurer la conformité avec les objectifs du protocole de Kyoto, sa mise en œuvre est indépendante de ce dernier. Après une phase test de 2005 à 2007, suivie d'une seconde phase coïncidant avec la période d'engagement du protocole de Kyoto (2008-2012), le SEQE-UE continue d'exister et devient la pierre angulaire de la politique européenne pour la lutte contre le changement climatique.

Le SEQE est un mécanisme de tarification des prix au même titre que, par exemple, la taxe carbone. Un nombre limité de quotas d'émissions est alloué à certaines entités et ces dernières peuvent ensuite se les vendre ou se les acheter en fonction de leurs besoins propres. Une fois le plafond d'émissions de CO<sub>2</sub> fixé, seule la demande des entités détermine le prix du CO<sub>2</sub> (Lovcha, Perez-Laborda, & Sikora, 2022). Dans la lignée du principe pollueur-payeur, les principaux émetteurs sont alors incités financièrement à réduire leurs rejets de CO<sub>2</sub>. Ainsi, le coût lié aux émissions encourage la réduction de la consommation en énergie, le passage à des carburants bas carbone ainsi que l'innovation et l'adoption de nouvelles technologies moins émettrices (Parry, Black, & Zhunussova, 2022). Le prix du quota se révèle alors être un facteur essentiel de l'efficacité du SEQE.

Cependant, après son lancement en 2005, le prix des quotas liés au SEQE-UE sont restés particulièrement bas. En réponse à cela, les décideurs politiques ont entamé une série de réformes divisées en plusieurs phases. Ces dernières cherchent successivement à corriger les problèmes liés aux précédentes et ajustent le plafond d'émissions en fonction des nouveaux objectifs de l'union européenne. Ce n'est qu'à partir de 2018 qu'on observe une franche augmentation du prix du CO<sub>2</sub> qui passent de 8€/tonne en 2018 à 25€/tonne en 2020 pour finir par dépasser 95€/tonne dans le courant de l'année 2022.

La question que se pose ce mémoire est : « Quels sont les relations entre les différents changements de phase et l'évolution du prix du CO<sub>2</sub> » ? Pour répondre à cette question, ce document se divise comme suit. Dans un premier temps, le **Chapitre 2** décrit et explique le fonctionnement du SEQE-UE, son évolution à travers ses différentes phases, ses réussites ainsi que ses faiblesses. Dans un second temps, différentes analyses statistiques sont effectuées sur l'évolution journalière des prix du CO<sub>2</sub> dans le **Chapitre 3**. Tout d'abord, une analyse de ruptures structurelles permet d'observer les différentes tendances des prix entre 2006 et 2022. On cherche alors à identifier les causes potentielles de ces changements de régimes en les reliant à des mesures politiques et événements macroéconomiques. Ensuite, un test de causalité de Granger est effectué dans le domaine temporel et fréquentiel afin d'observer les relations de causalité entre les changements de phase et le prix du CO<sub>2</sub>. Finalement, le **Chapitre 4** rassemble les conclusions de ce travail.

## Chapitre 2 - Marché Européen du Carbone

Lancé en 2005, le Système d'Échange de Quotas d'Émission de l'Union Européenne (SEQE-UE) est au centre de la politique climatique européenne. Ce mécanisme cherche à réduire les émissions de certains gaz à effet de serre<sup>1</sup> en leur assignant un prix. Pour cela, les droits d'émissions sont limités par un plafond et peuvent être achetés ou vendus par les parties prenantes concernées. Ce plafond diminue avec le temps et permet ainsi une diminution progressive des émissions totales.

Depuis sa création, le SEQE-UE est passé par plusieurs phases cherchant successivement à résoudre les lacunes de la précédente. Ainsi, les réglementations régissant son fonctionnement ont considérablement évolué au fil des années. Ces changements sont le résultat d'un procédé d'apprentissage par la pratique soumis à des événements imprévus (Teixidó, Verdeb, & Nicoll, 2019). Actuellement, le SEQE-UE se trouve dans sa quatrième phase qui a pour objectif d'atteindre une réduction d'émissions de 62% par rapport à 2005 d'ici 2030. Les réglementations propres aux différentes phases seront détaillées dans la section suivante.

À ce jour, le SEQE-UE couvre autour de 45% des émissions européennes à travers plus de 12 000 industries. Les secteurs concernés sont : la production d'électricité, les industries jugées fortement énergivores<sup>2</sup>, l'aviation au sein de l'espace économique européen ainsi que la production de certains matériaux ou composés chimiques (e.g. aluminium, acide nitrique, etc.) (Commission Européenne, s.d.). Certaines entreprises peuvent être exemptées si elles répondent aux conditions établies par la directive 2003/87/CE (Parlement européen et conseil, 2023).

À son lancement, le SEQE-UE était le premier grand système d'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre (Ellerman & Buchner, 2007). Depuis, de nombreux projets ont vu le jour à travers le monde. En avril 2023, la banque mondiale comptait 36 marchés d'échange de quotas couvrant environ 18% (9 Gt de CO<sub>2</sub>) des émissions globales de gaz à effet de serre (World Bank Group, 2023). Le marché national chinois, mis en route en juillet 2021, représente le plus grand SEQE au monde couvrant les émissions annuelles de 4.5 Gt de CO<sub>2</sub>

---

<sup>1</sup> Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), Méthane (CH<sub>4</sub>), Protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), Hydrocarbures fluorés (HFC), Hydrocarbures perfluorés (PFC) et Hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) (Parlement européen et conseil, 2023)

<sup>2</sup> Installations dont la puissance calorifique totale de combustion est supérieure à 20 MW (Parlement européen et conseil, 2023)

(IEA, 2022). La Figure 1 illustre les différents marchés du carbone à travers le monde avec en bleu, ceux mis en application, en vert ceux en développement et en jaune ceux en phase de considération.

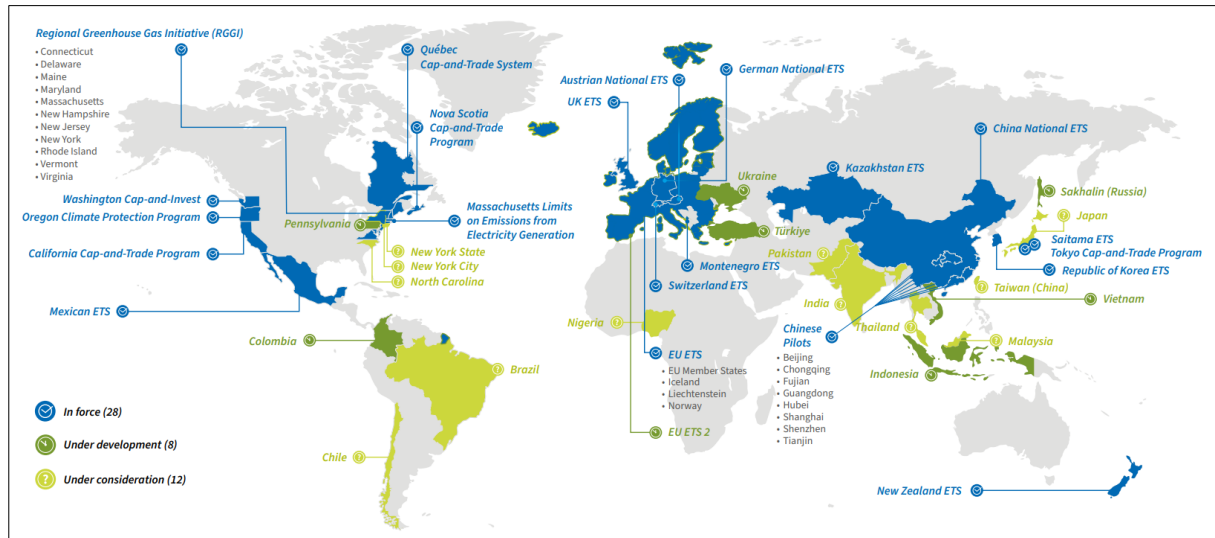


Figure 1: Les marchés du carbone dans le monde selon (International Carbon Action Partnership, 2023)

## 2.1 Fonctionnement général

La tarification du carbone est instrument permettant d’internaliser les coûts sociétaux liés aux émissions de gaz à effets de serre. Lorsqu’il est mis en place correctement, cet outil regroupe de nombreux avantages. Par exemple, il permet de stimuler la recherche, le développement et le déploiement de technologies durable, bas carbone. Si ce prix se reflète dans le prix des biens et services, il peut également inciter les consommateurs à modifier leurs comportements vers des modes de vie moins émetteurs. En outre, il constitue une source de revenus publics permettant de financer la transition ou de soutenir les individus les plus vulnérables aux élévations des coûts (IEA, 2020).

Le choix de l’union européenne s’est porté sur un système d’échange de quotas d’émissions basé sur le principe « cap and trade ». Cet instrument de marché permet de contrôler les émissions cumulées des entités concernées en fixant une limite globale à ne pas dépasser. La diminution progressive du plafond permet ainsi d’atteindre les objectifs de réduction désirés. Ce plafond d’émissions se divisent en quotas, aussi appelé en anglais EU allowances (EUA), qui représentent le droit d’émettre 1 tonne d’équivalent dioxyde de carbone.

À la fin de chaque année, les entreprises doivent remettre le nombre de quotas équivalent à leurs émissions de l'année précédente. Pour obtenir ces données, les entreprises sont tenues de mesurer et déclarer leurs émissions. Pour chaque tonne non restituée, elles s'exposent à une amende de 100€/tonne de CO<sub>2</sub> à laquelle peut s'ajouter des sanctions supplémentaires. De manière générale, le système est assez bien respecté même si quelques infractions ont été à déplorer (Stoefs, 2022).

Pour obtenir ces quotas, les entreprises ont trois solutions. Premièrement, elles peuvent en recevoir gratuitement. Un potentiel problème de l'application unilatéral du marché du carbone européen est le risque pour la compétitivité des entreprises de l'UE. En effet, les coûts supplémentaires qui y sont liés pourraient les désavantager face aux entreprises non soumises à des politiques de tarification du carbone. Ce déséquilibre pourrait résulter dans la délocalisation des émissions européennes qui, bien qu'elle induise une diminution locales des émissions, ne sert en rien la lutte contre le changement climatique (Verde, 2020). Afin d'éviter cet effet, certains secteurs à risque reçoivent un pourcentage de leurs besoins en allocations gratuitement.

Deuxièmement, les entreprises peuvent également se procurer des quotas via un système d'enchères tenu par la plateforme European Energy Exchange. Les revenus générés sont distribués aux états membres selon les parts d'émissions respectives sur la période de 2005 à 2007 (Commission Européenne, 2020). Depuis le début de la phase 3 en 2013, les enchères sont devenues la méthode par défaut pour distribuer les quotas. Cette méthode permet de récolter des revenus importants et de réinvestir ces derniers dans des projets liés au climat comme le développement de nouvelles technologies, le développement du réseau de transports en commun ou encore l'amélioration de l'efficacité énergétique. Cet argent peut également servir à contrecarrer les effets négatifs, comme par exemple la hausse des factures d'énergie, que pourrait avoir le SEQE-UE sur les foyers plus modestes (ICAP, 2019). De manière générale, l'utilisation judicieuse des revenus permet d'améliorer l'image et l'acceptabilité sociale et politique. Avec l'augmentation du prix du quota et la place de plus en plus importante des enchères comme mécanisme d'acquisition, les revenus liés au SEQE-UE ont fortement augmenté, atteignant pas loin de 25 milliards d'euros en 2021 (Marcu, et al., 2023).

La dernière possibilité pour se procurer des EUAs est de les acheter sur le marché secondaire. Ce dernier, tenu par plusieurs plateformes, permet aux entreprises de s'échanger les quotas entre elles (Stoefs, 2022). De cette manière, une entreprise ayant réussi à diminuer ses émissions pourrait tirer un profit des quotas supplémentaires ou les conserver pour plus tard. Avec le plafond qui diminue chaque année et les prix des quotas qui augmentent, les entreprises sont incitées financièrement à inclure la diminution de leurs émissions dans leur stratégie. Cette incitation est d'autant plus forte que cette diminution se fait à moindre coût, ce qui contribue à rendre le SEQE-UE « cost-effective ». La Figure 2 présente, entre 2005 et 2022, les allocations distribuées gratuitement (en rouge), les allocations vendues aux enchères (en bleu) et les émissions réelles (en orange).



Figure 2: Allocations gratuites (en rouge), vendues aux enchères (en bleu) et les émissions réelles (en orange).  
Source : [EU Emissions Trading System \(ETS\) data viewer — European Environment Agency \(europa.eu\)](https://www.eea.europa.eu/fr/observatoire-de-l-air/observatoire-de-l-air-2022)

Le plafond diminue chaque année selon un facteur de réduction linéaire, en anglais : linear reduction factor (LRF). Le LRF est exprimé comme un pourcentage du plafond total en 2013, soit environ 1928 millions d'EUAs. De 2013 à 2020, le LRF était fixé à 1.74% et a été augmenté à 2.2% à partir de 2021. Ce facteur de réduction peut directement mis en relation avec les ambitions climatique de l'UE. En accord avec la proposition « Fit for 55 » de la commission européenne visant à davantage diminuer les émissions de gaz à effet de serre (de 55% en 2030 par rapport à 1990), le LRF passera à 4.3% en 2024 pour être encore une fois augmenté à 4.4% à partir de 2028 (Marcu, et al., 2023).

## 2.2 Évolutions

Le SEQE-UE est un marché réglementé, ce qui implique que les décideurs politiques supervisent et contrôlent, dans une certaine mesure, son évolution. Les trois institutions principales de l'UE (i.e. la Commission européenne, le Parlement européen et le Conseil de l'Union européenne) sont alors impliquées dans les modifications majeures du marché visant à améliorer son fonctionnement ou à adapter ses ambitions (Stoefs, 2022). Depuis sa création en 2005, le SEQE-UE est passé par 4 phases dont la dernière, commencée en 2021, se poursuivra jusqu'en 2030. Certains des événements majeurs du SEQE-UE sont repris dans la Figure 3.

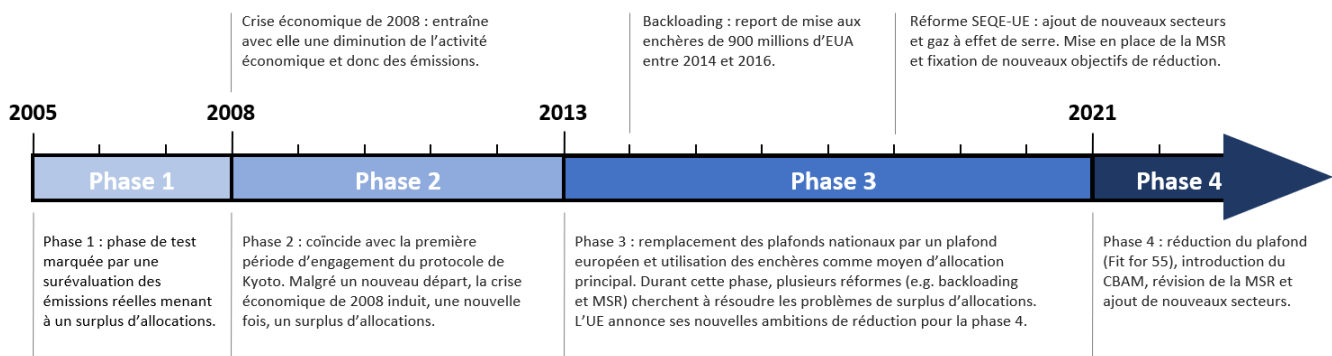


Figure 3 : Evènements majeurs du SEQE-UE entre 2005 et 2022.

### Phase 1 (2005 - 2007)

La phase 1 se présente comme une phase pilote, permettant de construire et de tester les infrastructures administratives nécessaires au sein de la commission européenne mais également au niveau national et dans les industries concernées. En outre, le but de cette phase était d'établir un prix de référence pour le CO<sub>2</sub>. Ce dernier devant en théorie graviter autour du coût marginal de réduction d'une tonne d'émission le plus bas (Sato, Rafaty, Calel, & Grubb, 2022). Cette première période devait permettre au SEQE-UE d'être complètement opérationnel durant la phase 2 et ainsi pouvoir soutenir les engagements de l'Europe lors du protocole de Kyoto.

Durant cette phase, le SEQE-UE couvre uniquement la production d'électricité et les industries énergivores au sein des 25 états membres de l'union européenne. Chacun d'entre eux peut décider librement combien d'EUA's seront assignés aux installations de leur

territoire. Le plafond total, représentant la somme des permis attribués au niveau national, est alors d'environ 2300 Mt de CO<sub>2</sub> par an (CREG, 2022). Les quotas sont pour la très grande majorité distribués gratuitement et basés sur des estimations des émissions historiques. Malheureusement, ces estimations se sont avérées fausses. Lorsque les estimations des émissions de la première année sont dévoilées, les entreprises découvrent que les plafonds alloués sont la plupart du temps supérieurs aux émissions réelles. Cette surabondance de quotas a mené les prix de l'EUA proche de 0 et a même permis à certains des plus gros émetteurs d'en générer du profit (Sato, Rafaty, Calel, & Grubb, 2022). Heureusement, il avait été prévu que les quotas de la phase 1 ne pourraient pas être transférés à la phase 2.

## **Phase 2 (2008 - 2012)**

La phase 2 reprend le système de plafonds nationaux mais ces derniers sont cette fois-ci déterminés sur base des données récoltées durant la première phase. De plus, les états membres liés par le protocole de Kyoto se voient forcés par la commission européenne d'aligner leurs plafonds avec leurs engagements. Ainsi, malgré le rajout de la Norvège, du Liechtenstein et de l'Islande, le plafond total diminue d'environ 9%. Pour la première fois, des enchères sont tenues. Cependant, bien qu'en légère diminution, la proportion de quotas distribués gratuitement reste écrasante. En outre, l'amende en cas de non-conformité passe de 40€ à 100€ la tonne. Malgré ces ajustements, la phase 2 verra le prix du CO<sub>2</sub> chuter fortement.

En effet, plusieurs éléments ont participé à la déstabilisation durable de l'offre et de la demande en EUAs. Tout d'abord, la crise économique de 2008 qui a entraîné une réduction des activités économiques et par la même une réduction des émissions. Cette diminution peut également être expliquée par la mise en place d'objectifs ambitieux en énergies renouvelables menés par certains pays (Cludius, Galster, Healy, Noka, & Lam, 2022). Ensuite, la possibilité d'utiliser des crédits internationaux (ERUs et CERs), généré en investissant dans des projets de réduction d'émissions dans d'autres pays, a créé un afflux supplémentaire de quotas. Le surplus de quotas a alors entraîné, pour une seconde fois, la chute du prix de l'EUA. Les quotas pouvant être conservés entre les différentes phases, ces derniers ont été accumulés par les entreprises.

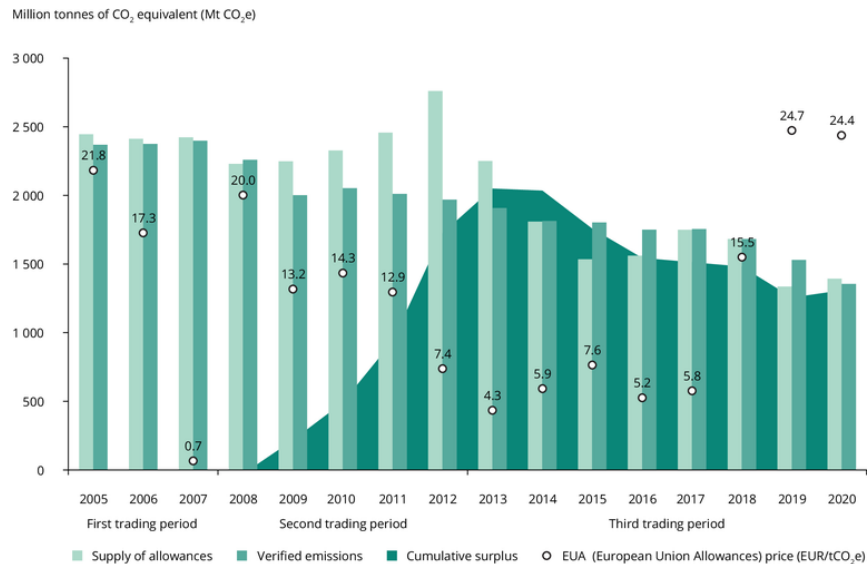


Figure 4: Surplus de quotas cumulés entre 2005 et 2020. Source : [Emissions, allowances, surplus and prices in the EU ETS, 2005-2020 — European Environment Agency \(europa.eu\)](https://www.euro.who.int/en/health-topics/air-quality/pollution-and-health/emissions-allowances-surplus-and-prices-in-the-eu-ets-2005-2020)

### Phase 3 (2013 - 2020)

Les évènements de la phase 2, notamment le surplus cumulé de 2000 millions d'EUA à la fin de l'année 2012, ont poussé à des modifications majeures de la structure du SEQE-UE. Le premier changement majeur est le remplacement des plafonds nationaux par un plafond unique européen. Cette centralisation permet d'éviter les négociations compliquées qu'a engendré la détermination des plans allocations nationaux tout en permettant à l'UE de mettre en adéquations le SEQE-UE avec les ambitions climatiques européennes. C'est à partir de la phase 3 que le LRF, discuté précédemment, diminue progressivement le nombre d'EUA alloués.

Un deuxième changement important est l'utilisation des enchères comme méthode par défaut pour obtenir des quotas. La proportion de quotas vendus aux enchères dépend cependant du secteur. Dans le cas de production d'électricité, elle est de 100%. Pour les autres secteurs, elle passe 20% en 2013 à 70% en 2020. Certaines exceptions existent, en particulier pour les secteurs considérés comme fortement à risque de délocalisation ainsi que dans quelques pays. De plus, les allocations de quotas ne se feront désormais plus sur base de données historiques mais en tenant compte des meilleures performances de chaque secteur (Sato, Rafaty, Calel, & Grubb, 2022). D'autres modifications sont : le rajout de certains secteurs et gaz à effet de serre (N<sub>2</sub>O et PFC), l'entrée de la Croatie et la limitation de l'utilisation des crédits internationaux. Ces derniers doivent être échangés contre des EUAs afin ne pas s'ajouter au plafond global et éviter d'accumuler davantage le surplus de quotas (Stoefs, 2022).

Malgré les réformes majeures, la phase 3 hérite des problèmes de la phase 2 et peine à faire augmenter le prix du CO<sub>2</sub>. Afin de contrecarrer l'accumulation de quotas, l'allocation de 900 millions d'EUA est reporté entre 2014 et 2016. Cette pratique, appelée « back-loading », ne permet que de régler le problème de manière ponctuelle. Afin de résoudre ce dernier de manière permanente, la commission européenne propose en 2014 l'introduction de la « Market Stability Reserve (MSR) ».

La MSR cherche à rendre le SEQE-UE plus résilient en lui permettant d'ajuster le nombre de quotas alloués en fonction du nombre de quotas en circulation. Chaque année, le surplus de quotas est calculé et s'il dépasse 883 millions de tonnes, un pourcentage des allocations est transféré dans la réserve. Ainsi, la MSR ne retire pas les surplus d'allocations détenus par les entreprises mais limite le nombre de quotas alloués dans le futur. Après avoir été approuvé en 2015, la MSR rentre en action en janvier 2019.

Depuis 2015, l'UE commence à préparer l'arrivée de la phase 4 par une série de réformes à propos de la MSR, du LRF et des nouvelles ambitions liées aux accords de Paris (Bai & Okullo, 2023). En 2018, une révision de la directive SEQE-UE (Parlement européen et conseil, 2023) est adoptée. Toutes ces nouvelles actions renforcent la crédibilité du marché du carbone européen et incite les entreprises à reconsidérer son importance. Bien que la plupart ne rentrent en application qu'à partir de la phase 4, les prix de l'EUA augmente dès 2017 (Cludius, Galster, Healy, Noka, & Lam, 2022)

### **Phase 4 (2021 - 2030)**

La quatrième phase commence donc sur une base nouvelle, pour une fois, plutôt positive. Le LRF est passé de 1.74% à 2.2%, la proportion d'allocations gratuites continue de diminuer et la MSR est complètement opérationnelle. Suite au Brexit, le Royaume-Uni ne fait désormais plus partie du marché du carbone européen. Deux autres événements inattendus viennent perturber la phase 4 : la crise du COVID-19 et l'invasion de l'Ukraine par la Russie. Dans les deux cas, le prix de l'EUA a chuté pour ensuite se rétablir rapidement (Cludius, Galster, Healy, Noka, & Lam, 2022). En février 2023, le quota de CO<sub>2</sub> dépasse le seuil symbolique de 100€ la tonne pour la première fois.

Durant l'année 2021, la commission européenne présente une proposition de révision du SEQE-UE visant à aligner ce dernier avec le « Pacte vert pour l'Europe ». Le Pacte vert pour l'Europe, ou European Green Deal en anglais, est un ensemble d'initiatives politiques visant à rendre l'Europe climatiquement neutre d'ici 2050. Cet objectif ambitieux implique la réduction intermédiaire des émissions de 55% par rapport à 1990 d'ici 2030.

Les propositions législatives, cherchant à aligner le SEQE-UE avec le pacte, font parties du « Fit for 55 package » et contient notamment <sup>3</sup>: la réduction du plafond et l'augmentation du LRF, l'introduction du « Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) » dans le but de progressivement abandonner les quotas gratuits, une révision de la MSR et l'extension du marché du carbone au secteur de transport maritime (Erbach & Foukalová, 2023). Les révisions, adoptées en avril 2023, entreront en action dans les années à suivre et modifieront fortement l'allure du marché du carbone européen.

---

<sup>3</sup> Plus d'informations sur les différents changements apportés par les réformes sont disponibles sur le site du conseil de l'UE : ['Fit for 55': Council adopts key pieces of legislation delivering on 2030 climate targets - Consilium \(europa.eu\)](https://consilium.europa.eu/fr/fit-for-55/)

## Chapitre 3 – Résultats et discussion

Cette section cherche à comprendre l'influence des différentes réformes et phases du SEQUE-UE sur le prix des quotas d'émissions. Pour cela, deux analyses statistiques sont effectuées sur l'évolution du prix du CO<sub>2</sub>. Dans un premier temps, nous cherchons à observer les ruptures structurelles présentes et à les mettre en lien avec des événements macroéconomiques. Dans un second temps, nous effectuons un test de causalité prédictive de Granger afin de déterminer si les changements de phases du SEQUE-UE peuvent expliquer le comportement du prix des quotas.

### 3.1 Données

Les données utilisées correspondent aux prix journaliers d'un quota entre janvier 2006 et décembre 2022. Elles ont été fournies par le Partenariat international d'action sur le carbone (ICAP<sup>4</sup>), un forum cherchant à faciliter la coopération entre les différentes institutions qui poursuivent ou cherche à mettre en place un SEQUE. L'ICAP a été fondé en 2007 et compte actuellement 34 membres (Australie, France, Allemagne, etc.) et 7 observateurs (Canada, Japon, Singapour, etc.).

Les valeurs correspondent aux prix au comptant d'une EUA et ont elles-mêmes été tirées de la plateforme European Energy Exchange (EEX), principale responsable de la mise aux enchères des quotas. On peut observer les données sur la Figure 5 ci-dessous.

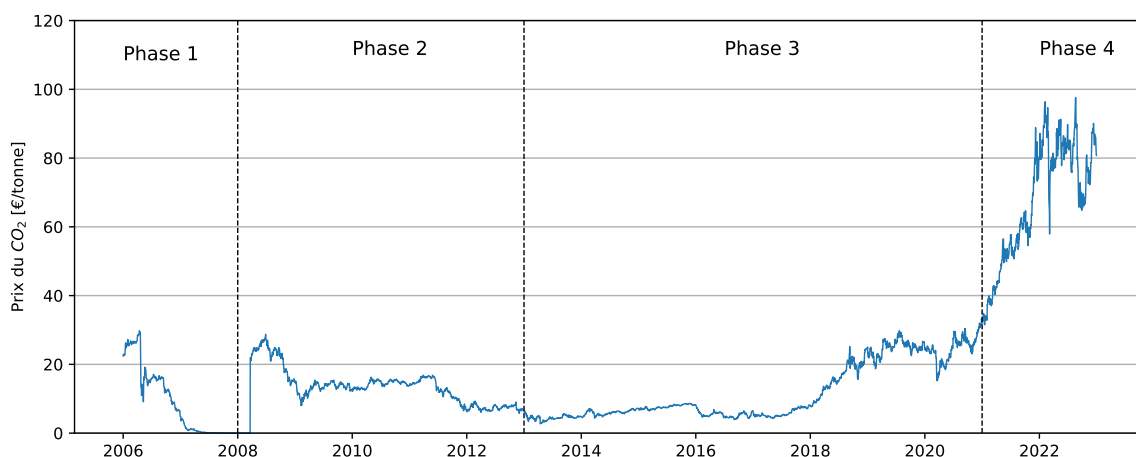


Figure 5 : Prix journalier du CO<sub>2</sub> (EUA) entre janvier 2006 et décembre 2022, basé sur les données fournies par l'ICAP. Le commencement des phases 2, 3 et 4 du SEQUE-UE sont également indiquées, respectivement : 2008, 2013 et 2021.

<sup>4</sup> Les données de l'ICAP sont accessibles via : [Allowance Price Explorer | International Carbon Action Partnership \(icapcarbonaction.com\)](https://www.allowancepriceexplorer.com/)

Une analyse préliminaire nous permet de caractériser le comportement général des différentes phases. Pour cela, la moyenne, médiane, variance ainsi que les prix maximum et minimum ont été calculées pour chaque phase ainsi que pour l'ensemble des données ; elles sont rassemblées dans le Tableau 1.

Phase	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Variance
1	0.01	29.78	8.83	4.81	91.93
2	0.01	28.75	13.02	13.41	32.35
3	2.68	33.28	11.86	7.18	72.41
4	31.53	97.58	67.05	69.35	299.19
Total	0.01	97.58	18.34	12.65	407.48

*Tableau 1 : Résultats de l'analyse préliminaire sur l'évolution du prix du CO<sub>2</sub> entre janvier 2006 et décembre 2022. Note : les résultats de la phase 1 ne concernent que la période à partir de janvier 2006 et ceux de la phase 4 s'arrêtent en décembre 2022.*

De manière générale, on observe une forte différence entre les trois premières phases et la quatrième. De 2006 à 2020, les prix moyens restent proche de la dizaine d'euro par tonne et n'atteignent leurs valeurs maximums, autour de 30 euros par tonne, que pour de courtes périodes. On observe que, dans le cas de la troisième phase, les prix du CO<sub>2</sub> montrent une tendance à la hausse là où les phases 1 et 2 voyaient les prix diminuer avec le temps. La quatrième phase confirme cette tendance avec un prix moyen de près de 70 euros par tonne et un maximum atteignant 97.58 euros. Cette phase se caractérise également par une plus grande volatilité des prix avec une variance au moins trois fois plus grande que celle de ses prédécesseurs.

## 3.2 Rupture Structurelle

Comme nous avons pu l'observer précédemment, le prix du CO<sub>2</sub> subit de nombreuses fluctuations. Celles-ci sont en parties déterminées par le marché de l'énergie (gaz naturel, pétrole, électricité, etc.) ainsi que par l'activité économique (Lovcha, Perez-Laborda, & Sikora, 2022). Cependant, ces variables n'expliquent pas à elles seules les variations du prix du CO<sub>2</sub>. Dans cette section, nous cherchons à mettre en lien les variations de régimes dans le prix du CO<sub>2</sub> avec des évènements macroéconomiques.

Pour cela, une analyse de rupture structurelle a été effectuée. Cette dernière cherche à identifier des changements inattendus dans les paramètres du modèle de régression. On cherche alors à déterminer le point de rupture  $K$  d'un intervalle de temps  $[1, T]$  tel que les régressions sur les intervalles  $[1, K]$  et  $[K+1, T]$  correspondent mieux aux données que la régression sur l'intervalle  $[1, T]$ .

Si la plupart des travaux se concentrent sur l'identification d'un seul changement de structure, Bai et Perron proposent en 1998 une méthode permettant d'en identifier plusieurs sur base d'un modèle de régression linéaire estimé par la méthode des moindres carrés. Pour  $m$  ruptures, le modèle se formule comme suit :

$$y_t = x_t' \beta + z_t' \delta_j + u_t \quad \text{avec } t = T_{j-1} + 1, \dots, T_j \quad \text{pour } j = 1, \dots, m+1$$

Dans cette équation,  $y_t$  est la variable dépendante observée au temps  $t$  ;  $x_t$  et  $z_t$  sont des vecteurs de covariables ;  $\beta$  et  $\delta_j$  sont les vecteurs de coefficients correspondants et finalement,  $u_t$  est la perturbation au temps  $t$ . Les coefficients de régression  $\beta$  et  $\delta_j$  ainsi que les points de rupture  $(T_1, \dots, T_m)$  sont alors estimés en parallèle. La résolution complète de ce problème sort du cadre de ce travail mais le lecteur curieux trouvera plus d'informations dans le document (Bai & Perron, 2001).

Pratiquement, les points de ruptures ont été calculés avec le langage de programmation R, à l'aide du package *strucchange*<sup>5</sup> (Version 1.5-3). Le code complet est présent dans la section A des annexes. Dans un premier temps, les points de ruptures ont été estimés sur base des prix mensuels calculés comme étant le prix du dernier jour du mois. La fonction *breakpoints()* a permis d'obtenir 5 points de rupture divisant ainsi les données en 6 périodes. Dans un second temps, les points de rupture ont été recalculés individuellement sur base d'un intervalle de données journalières allant de moins à plus d'un an autour du point de rupture mensuel. Ces résultats, qui ne dévient pas fortement des précédents, sont rassemblés dans le Tableau 2 ci-dessous. Les coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  des régressions linéaires telles que :  $y(t) = \alpha.t + \beta$  sont également repris.

---

<sup>5</sup> Informations relatives au package accessibles via : [CRAN - Package strucchange \(r-project.org\)](https://cran.r-project.org/web/packages/strucchange/index.html)

Période	Début	Fin	Coefficient alpha	Coefficient beta
1	01.01.2006	24.03.2008	-12.8	22.37
2	24.03.2008	25.09.2011	-2.25	19.66
3	25.09.2011	02.11.2014	-1.76	7.89
4	02.11.2014	20.03.2018	-0.10	6.71
5	20.03.2018	02.02.2021	4.20	17.22
6	02.02.2021	31.12.2022	23.23	46.87

Tableau 2: Données caractérisant les 6 périodes définies par les points de rupture. Ces derniers ont été calculés sur base des prix journaliers du CO<sub>2</sub> (eua).

## Interprétation

Lors du lancement du SEQUE-UE en 2005, la plupart des quotas ont été donné gratuitement, sur base d'une estimation des émissions globales. Lorsqu'en avril 2006, certaines données révèlent que les émissions réelles sont en fait plus petites que le plafond, le prix du CO<sub>2</sub> s'écroule. Vers la fin de 2007, ce dernier avait atteint 0.02 € par tonne.

Au début de la seconde phase en 2008, les quotas accumulés lors de la première ne sont plus valables ce qui permet de donner un nouveau départ. De plus, le nouveau plafond a été ajusté pour être en dessous des émissions réelles. Cependant, au même moment, le monde est frappé par la grande récession entre 2008 et 2009. Cette crise économique majeure est marquée par une forte hausse des prix du pétrole et par une baisse des activités économiques. Les chutes des émissions de CO<sub>2</sub> en découlant permet une accumulation des quotas d'émissions. Après être passé sous la barre des 10€/tonne en février 2009, le prix du quota se stabilise autour de 15€ la tonne.

Après 2 années relativement stables, les prix chutent à nouveau vers le milieu de l'année 2011. Cette diminution ne trouve pas d'explication tranchée dans la littérature mais certaines pistes sont émises. Selon (Koch, Fuss, Grosjean, & Edenhofer, 2014), les facteurs d'influences les plus probables sont : la crise de la dette européenne, le déploiement d'énergies renouvelables, l'utilisation massive de crédits internationaux (CER et ERU).

À partir du lancement de la phase 3 en 2013, les prix commencent à augmenter légèrement. Cette dernière est marquée par plusieurs réformes visant à améliorer l'efficacité jusque là contestée du SEQE. En particulier, le passage à un plafond européen et non plus national et la place plus importante des enchères comme moyen d'acquisition. Entre 2014 et 2016, 900 millions de quotas sont retirés de la vente aux enchères afin de palier au surplus de quotas cumulés durant la phase 2. L'idée première était de les remettre en circulation aux alentours de 2019-2020 mais ils seront finalement placés dans la réserve de stabilité du marché. L'idée de cette dernière a été proposée pour la première fois en janvier 2014. Le changement de phase ainsi que les actions et projets visant à résoudre les problèmes du SEQE-UE ont certainement pu influencer positivement les prix du CO<sub>2</sub>.

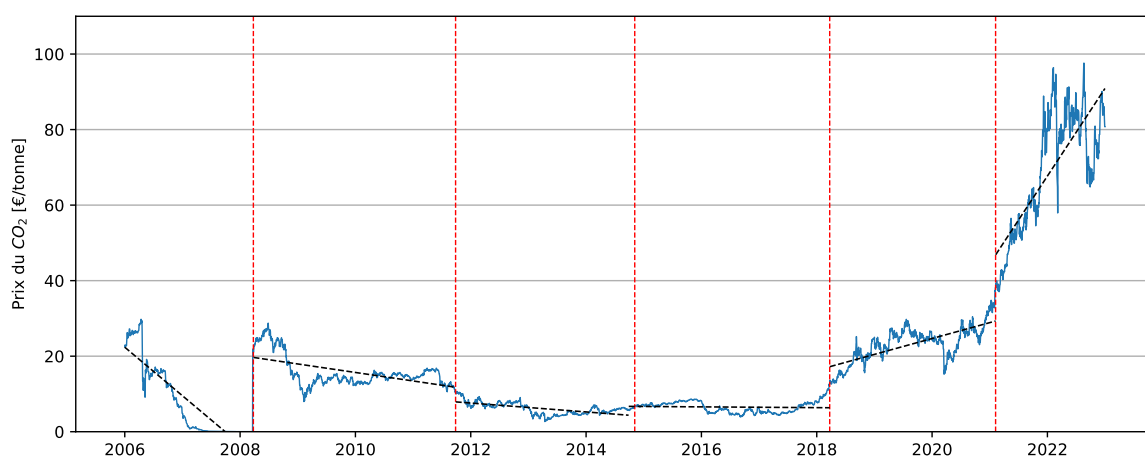


Figure 6 : Prix du quota (eua) entre 2006 et 2022. Les lignes rouges verticales représentent les points de ruptures, divisant les données en 6 périodes. Pour chacune d'entre elle, une régression linéaire est représentée en traits noirs.

Vers la fin de la phase 3, plusieurs réformes majeures viennent modifier le SEQE-UE. En mars 2018, le système de MSR est renforcé. Cette annonce est probablement à l'origine de l'augmentation majeure du prix du CO<sub>2</sub> qui passe au dessus de 20€/tonne, ce qui n'avait plus été le cas depuis 2008. Après une petite rechute dû à la crise du COVID courant 2020, les prix repartent en flèche au lancement de la phase 4.

Globalement, les points de ruptures obtenus mettent en lumière les changements de régimes au cours des différentes phases. On note plus particulièrement l'importance marquée des ruptures de mars 2008, mars 2018 et février 2021. La première correspond à la transition entre la phase de test (phase 1) et deuxième phase. Cependant cette rupture majeure semble avoir une influence ponctuelle et ne permet pas aux prix du CO<sub>2</sub> de maintenir sa valeur. Au

contraires, les deux derniers points de ruptures, marqués par des réformes profondes du fonctionnement du SEQE-UE, semblent provoquer une réponse très favorable.

Il est important de souligner que cette étude statistique ne permet pas de lier avec certitude les points de ruptures aux évènements qui les ont provoqués. Néanmoins, ils permettent de nous éclairer sur les différents changements de régime qu'à traversé le prix du CO<sub>2</sub> au cours des différentes phases. Afin d'affiner notre recherche, la section suivante cherche à déterminer avec plus de rigueur les liens qui existent entre le changement de phase et l'évolution du prix du quota.

### 3.3 Causalité de Granger

Le test de causalité de Granger (Granger, 1969) est un test d'hypothèse statistique cherchant à déterminer si une série temporelle est utile pour prédire une autre. Par utile, on signifie que l'erreur de prédiction en devient plus petite. Malgré ce que sous-entend son nom, le test de causalité de Granger n'établit pas un lien de causalité au sens strict. La capacité d'une variable à en prédire une autre ne signifie pas que l'évolution de la première soit à l'origine de celle de la deuxième. La Figure 7 permet d'illustrer comment l'identification d'un paterne, relativement semblable entre X et Y, peut permettre de prédire l'évolution de Y sur base de celle de X.

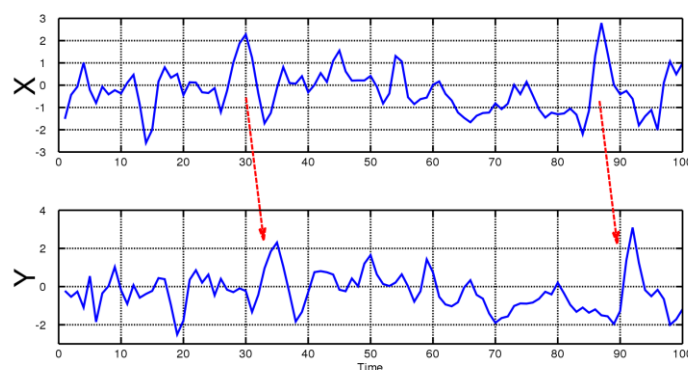


Figure 7 : Illustration<sup>6</sup> du principe de causalité de Granger, les valeurs passées de X permettent de prédire les valeurs futures de Y.

<sup>6</sup> Illustration tirée de : [Granger causality - Wikipedia](#)

Le test de Granger se base sur un modèle à vecteurs autorégressifs (VAR) à deux variables, représenté par l'équation ci-dessous. L'hypothèse nulle qui stipule que X ne cause pas Y, est vérifiée en comparant l'autorégression de Y avec le VAR incluant Y et X (voir équation ci-dessous). Dans notre cas, Y représente le prix du CO<sub>2</sub> et X représente un vecteur en escalier tel que X vaut 0 avant un changement de phase et 1 après.

$$Y_t = \sum_{n=1}^k a_n Y_{t-n} + \sum_{n=1}^k b_n X_{t-n} + \epsilon_t$$

Pour connaître l'ordre n de notre modèle, c'est-à-dire le nombre d'itération de X et Y utilisé pour prédire une valeur de Y, nous utilisons le critère AIC. Le choix de l'ordre est le résultat d'un compromis entre : un grand ordre et donc un plus grand nombre de données explicatives, et un trop grand ordre qui rajoute de la complexité à notre modèle. Le test AIC nous permet d'estimer la qualité relative de notre modèle pour différents ordres et ainsi choisir le plus optimal. Dans notre cas, le critère est minimisé pour un ordre n = 9. Afin de montrer que nos résultats ne dépendent pas uniquement de ce choix, la suite de l'analyse est réalisée pour n = 4, 8 et 9.

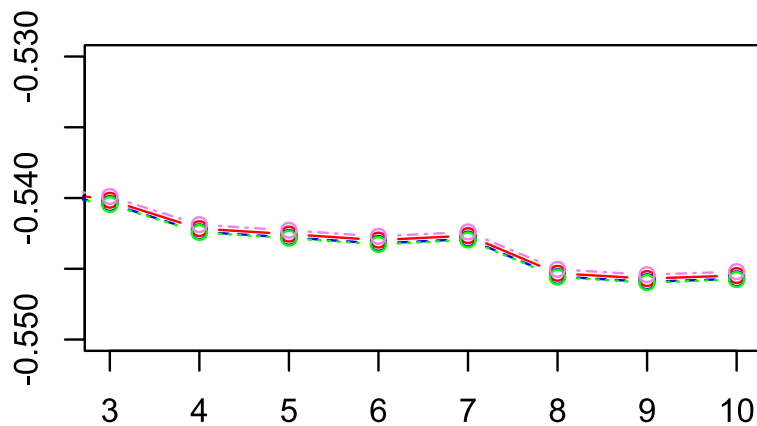


Figure 8 : résultats du critère d'information AIC pour différents ordres de VAR.

Le test de causalité de Granger a été réalisé à la fois dans le domaine temporel et fréquentiel. Dans le premier cas, la fonction `grangertest()` du package `lmtest`<sup>7</sup> a été utilisée pour n = 4, 8 et 9. Dans le second cas, nous utilisons la fonction `bc_test_uncond()` du package `grangers`<sup>8</sup>, basée sur les travaux de (Breitung & Candelon, 2005). Les résultats obtenus pour n = 8 sont rassemblés dans le Tableau 3.

<sup>7</sup> Informations relatives au package `lmtest` accessibles via : [CRAN - Package lmtest \(r-project.org\)](https://cran.r-project.org/web/packages/lmtest/index.html)

<sup>8</sup> Informations relatives au package `grangers` accessibles via : [CRAN - Package grangers \(r-project.org\)](https://cran.r-project.org/web/packages/grangers/index.html)

Phase	Domaine temporel		Domaine fréquentiel			
	F	Pr(>F)	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$
2	0.2951	0.9679	2	0.2	0	0.1
3	0.2861	0.9708	0.1	0.2	0.4	0.4
4	3.2885	0.0009***	6.4**	0.1	1.2	2.8

Tableau 3 : Résultat du test de causalité de Granger ( $n=4$ ) pour le passage à la phase 2, 3 et 4. Dans le domaine temporel, le test de Fisher ( $F$ ) ainsi que la  $p$ -value ( $Pr(>F)$ ) sont donnés. Dans le domaine fréquentiel, les résultats sont obtenus pour des fréquences  $0, \pi/4, \pi/2$  et  $3\pi/4$ .

Dans le domaine temporel, on observe une  $p$ -value très significative pour le passage à la phase 4 ce qui permet de réfuter l'hypothèse nulle. La causalité de Granger entre le début de la phase 4 et le prix du CO<sub>2</sub> est également confirmée par le test en domaine fréquentiel. En effet, à base fréquence ( $f \approx 0$ ), la valeur obtenue dépasse la valeur critique de 6 ce qui la rend significative.

## Interprétation

Suite au test de causalité de Granger, nous observons une relation causale de Granger significative entre le prix du CO<sub>2</sub> et le passage à la phase 4, à la fois dans le domaine temporel et fréquentiel. De plus, l'utilisation du test de Granger dans le domaine fréquentiel nous permet de distinguer l'influence court et long terme des politiques climatiques mises en place (Candelon & Hasse, 2023). Comme l'illustre la Figure 9, calculée sur base du package Gretl de (Breitung & Shreiber, 2018), la relation de causalité n'est significative qu'à basses fréquences, plus petites que 1.5, ce qui indique que le passage à la quatrième phase du SEQE-UE a eu un impact relativement long terme sur le prix de l'EUA.

Les changements apportés lors du passage à la phase 4 du SEQE-UE semblent avoir réussi là où les trois premières phases avaient échoués. L'importance croissante des enchères comme moyen d'allocations des EUAs ainsi que la mise en place de la MSR afin de réguler le surplus de quotas ont permis de faire grimper le prix de CO<sub>2</sub> et de rendre ce dernier plus résilient. Ce changement de tendance ainsi que les objectifs toujours plus ambitieux de l'UE ont certainement contribué à augmenter la crédibilité accordée au marché du carbone européen.

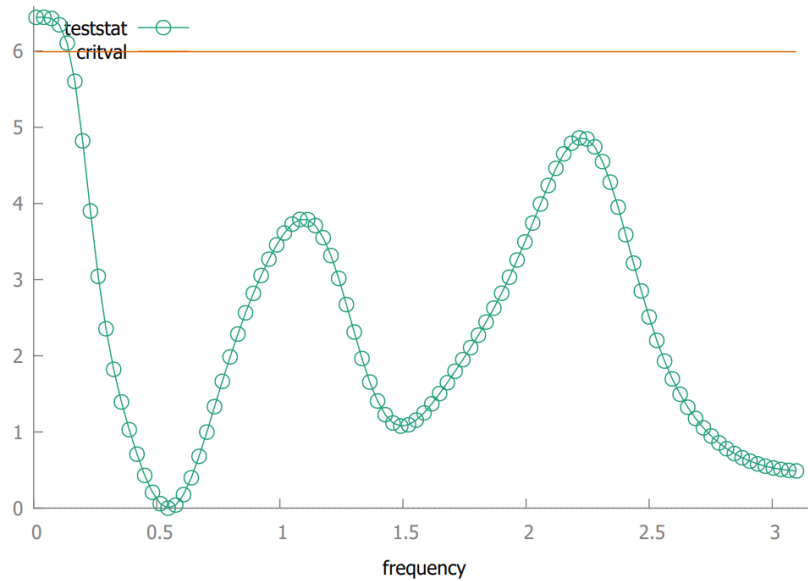


Figure 9 : Illustration du test de causalité de Granger dans le domaine fréquentiel entre le prix du CO<sub>2</sub> et le commencement de la phase 4 du SEQE-UE. La relation de causalité est significative pour des fréquences inférieures à 1.5.

Afin de nous assurer de la robustesse des résultats, l'analyse de Granger a également été effectuées pour des ordres  $n = 4$  et  $9$ . Les résultats obtenus dans le domaine temporel, disponibles dans le Tableau 4, confirme la relation causale significative entre le prix du CO<sub>2</sub> et le passage à la phase 4, indépendamment de l'ordre choisi.

Phase	Domaine temporel : Pr(>F)		
	n = 4	n = 8	n = 9
2	0.6943	0.9679	0.9869
3	0.7287	0.9708	0.9847
4	0.0002***	0.0009***	0.0014**

Tableau 4 : comparaison des résultats du test de causalité de Granger pour différents ordres  $n$ .

## Chapitre 4 - Conclusion

Depuis sa création en 2005, le système d'échange de quotas d'émission est au centre de la politique climatique de l'union européenne. Ce mécanisme de tarification du carbone a pour but de réduire les émissions de gaz à effet de serre par l'instauration d'un plafond d'émissions. Les émissions sous ce plafond sont divisées en quotas, i.e. en droits d'émettre une tonne d'équivalent CO<sub>2</sub>, qui peuvent être reçus gratuitement, achetés aux enchères ou encore échangés entre les acteurs du marché. Depuis son lancement, le SEQE-UE a été sujet à de nombreuses réformes, organisées en phases, visant à améliorer son efficacité souvent contestée. Au centre de ces critiques, un prix du quota longtemps resté bas (~10€/tonne). Cependant, la tendance semble s'être inversée puisqu'en février dernier, la tonne de CO<sub>2</sub> passait pour la première fois au dessus des 100 euros. Ce travail cherche à comprendre les différentes tendances par lesquels est passé le prix du carbone et en particulier, à comprendre la relation entre ces dernières et les changements de phases du SEQE-UE.

Tout d'abord, une analyse de ruptures structurelles met en évidence les changements de régimes du prix entre 2006 et 2022. Sur les 6 périodes identifiées, seules les deux dernières (2018-2020 et 2021-2022) présentent une tendance haussière. En 2018, le SEQE-UE est réformé profondément par l'entrée en action de la Market Stability Reserve et par la définition d'un nouveau cadre pour la quatrième phase, lancée en 2021. Ces modifications ambitieuses ont démontré la volonté de l'UE de résoudre les problèmes rencontrés par le marché du carbone, en particulier les surplus d'allocations. Ainsi, la confiance en l'efficacité future du SEQE-UE a augmenté en même temps que les prix du quota.

Ensuite, une analyse de causalité de Granger nous permet d'observer avec plus de rigueur les liens qui existent entre les changements de phases et l'évolution du prix du CO<sub>2</sub>. Que ce soit dans le domaine temporel ou fréquentiel, le passage de la phase 3 à la phase 4 cause, au sens de Granger, une augmentation des prix du quota. De plus, l'analyse fréquentiel nous renseigne sur le caractère long terme de cette relation.

La mise en place du marché du carbone européen est un très bon exemple de l'apprentissage par la pratique. Après plus d'une décennie d'ajustements, et bien que de nombreux défis soient encore devant lui, le SEQE-UE semble finalement capable de tenir ses promesses.

# Annexe

## A. Code pour ruptures structurelles

```
#Looking for structural breakpoints in carbon price (EU ETS) from 2006 to 2022
```

```
library(strucchange)
```

```
library(tseries)
```

```
library(plotly)
```

```
library(TSstudio)
```

```
#To be adapted according to file location
```

```
setwd("d:/Documents/UCL/Master_Gestion/Mémoire/R_Code/")
```

```
# cp: carbon price
```

```
cp <- read.csv("ETS_Data.csv", header = TRUE, sep = ";", stringsAsFactors = FALSE)
```

### **#Monthly Analysis**

```
#Monthly prices (cpM) starting in 2006
```

```
cpM <- cp$Price_M[11:250]
```

```
cpM <- ts(na.omit(cpM), start=2006, end=2023, frequency = 12)
```

```
cpM <- window(cpM, c(2006,1), c(2022,12))
```

```
plot.ts(cpM)
```

```
#Monthly breakpoints (bpM)
```

```
bpM = breakpoints(Monthly_Prices~1, breaks = 5)
```

```
s = summary(bpM)
```

```
print(cat("Breakpoints occur at :",cPrice$Date_M[10 + s$breakpoints[5,]]))
```

```
abline(v = c(2008+5/12,2011+8/12,2014+8/12,2017+11/12,2020+5/12), col="green")
```

## #Daily Analysis

```
cpD <- cp$Price_D[299:length(cp$Price_D)]
cpD <- ts(na.omit(cpD), start=2006, end=2023, frequency = 365)
cpD <- window(cpD, c(2006,1), c(2022,365))
```

```
plot.ts(cpD)
```

```
#Focus on period around monthly breakdates (+-1 yr.)
```

```
bp1 = breakpoints(window(Daily_Prices, c(2007,180), c(2009,180))~1, breaks = 1)
bp2 = breakpoints(window(Daily_Prices, c(2010,270), c(2012,270))~1, breaks = 1)
bp3 = breakpoints(window(Daily_Prices, c(2013,270), c(2015,270))~1, breaks = 1)
bp4 = breakpoints(window(Daily_Prices, c(2016,365), c(2018,365))~1, breaks = 1)
bp5 = breakpoints(window(Daily_Prices, c(2019,180), c(2021,180))~1, breaks = 1)
```

```
abline(v=c(breakdates(bp1),breakdates(bp2),breakdates(bp3),breakdates(bp4),
breakdates(bp5)),col="red")
abline(v = c(2008+5/12,2011+8/12,2014+8/12,2017+11/12,2020+5/12), col="green")
```

## B. Code pour causalité prédictive de Granger

```
#Looking for Grangers predictive causality between CO2 price and phase changes in EU ETS.
```

```
library(tseries)
library(vars)
library(grangers)
library(lmtest)
```

```
setwd("d:/Documents/UCL/Master_Gestion/Mémoire/R_Code/") #To be adapted according
to file location
```

## **#Data**

```
# cp: carbon price
cp <- read.csv("ETS_Data.csv", header = TRUE, sep = ";", stringsAsFactors = FALSE)
```

```
cpD <- cp$Price_D[299:length(cp$Price_D)]
cpD <- ts(na.omit(cpD), start=2006, end=2023, frequency = 365)
cpD <- window(cpD, c(2006,1), c(2022,365))
dates <- cp$Date_D[299:length(cp$Date_D)]
```

```
plot.ts(cpD)
```

## **#Step Vectors (for each phase change)**

```
ph2 <- integer(length(cpD))
ph2[match("01.01.2008",dates):length(cpD)] = 1
ph2 <- ts(ph2, start = 2006, end=2023, frequency = 365)
ph2 <- window(ph2, c(2006,1), c(2022,365))
```

```
ph3 <- integer(length(cpD))
ph3[match("01.01.2013",dates):length(cpD)] = 1
ph3 <- ts(ph3, start = 2006, end=2023, frequency = 365)
ph3 <- window(ph3, c(2006,1), c(2022,365))
```

```
ph4 <- integer(length(cpD))
ph4[match("01.01.2021",dates):length(cpD)] = 1
ph4 <- ts(ph4, start = 2006, end=2023, frequency = 365)
ph4 <- window(ph4, c(2006,1), c(2022,365))
```

## **#Optimal lag - AIC Test (given by Pr. Jean-Baptiste Hasse)**

```
l_both <- VARselect(dp, lag.max = 10, type="both")
v_both_aic <- as.numeric(l_both$criteria[1,])
l_const <- VARselect(dp, lag.max = 10, type="const")
```

```

v_const_aic <- as.numeric(l_const$criteria[1,])
l_trend <- VARselect(dp, lag.max = 10, type="trend")
v_trend_aic <- as.numeric(l_trend$criteria[1,])
l_none <- VARselect(dp, lag.max = 10, type="none")
v_none_aic <- as.numeric(l_none$criteria[1,])

plot(v_none_aic, type = "b", col = "red", xlim = c(3,10), ylim = c(-0.55,-0.53), ylab = "AIC",
xlab = "p lags", main = "Information Criteria for different VAR(p)")
lines(v_both_aic, type = "b", col = "blue", lty=2)
lines(v_trend_aic, type = "b", col = "green", lty=3)
lines(v_const_aic, type = "b", col = "violet", lty=4)

```

### **#Granger Causality Test**

```
#Time domain analysis for phases 2, 3 and 4 with order 4,8 and 9
```

```
timeTest2 <- grangertest(dp ~ ph2, order = 4)
```

```
timeTest3 <- grangertest(dp ~ ph3, order = 4)
```

```
timeTest4 <- grangertest(dp ~ ph4, order = 4)
```

```
timeTest2 <- grangertest(dp ~ ph2, order = 8)
```

```
timeTest3 <- grangertest(dp ~ ph3, order = 8)
```

```
timeTest4 <- grangertest(dp ~ ph4, order = 8)
```

```
timeTest2 <- grangertest(dp ~ ph2, order = 9)
```

```
timeTest3 <- grangertest(dp ~ ph3, order = 9)
```

```
timeTest4 <- grangertest(dp ~ ph4, order = 9)
```

```
#Frequency domain (Note that thesis values were computed with Gretl software)
```

```
uncondTest2 <- bc_test_uncond(dp,ph2)
```

```
uncondTest3 <- bc_test_uncond(dp,ph3)
```

```
uncondTest4 <- bc_test_uncond(dp,ph4)
```

## C. Contenu additionnel

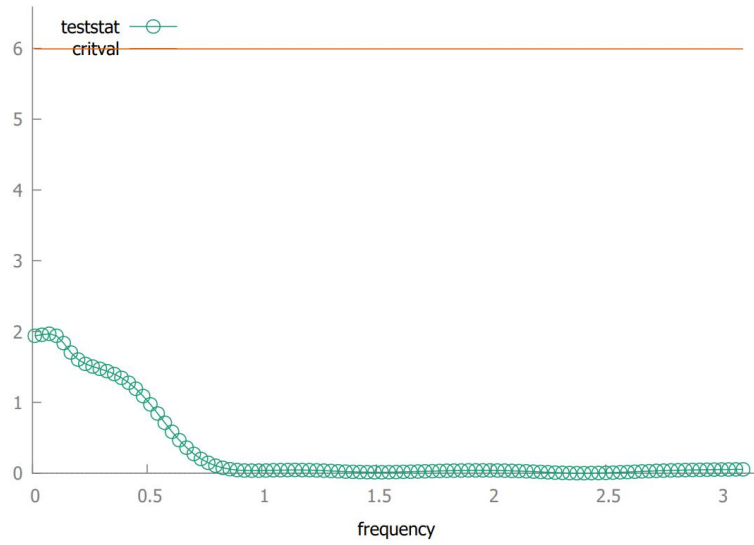


Figure 10: Illustration du test de causalité de Granger dans le domaine fréquentiel entre le prix du  $\text{CO}_2$  et le commencement de la phase 2 du SEQE-UE. La relation de causalité n'est pas significative.

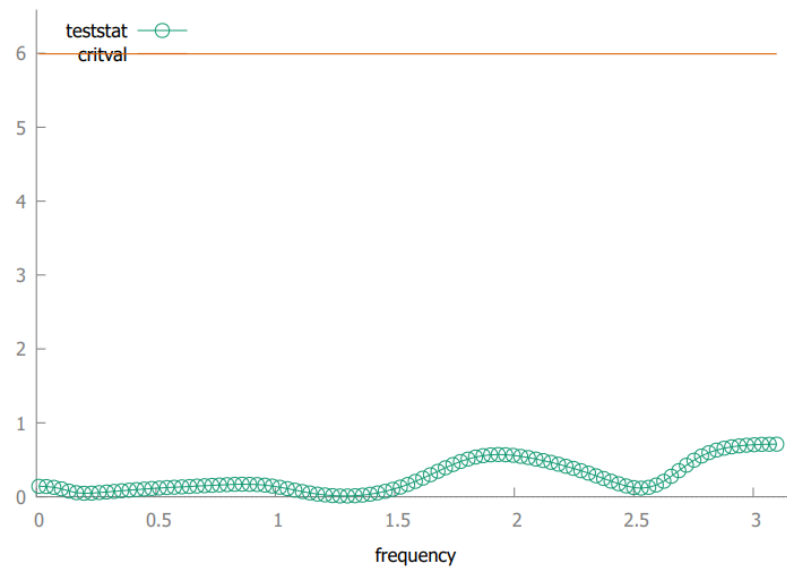


Figure 11: Illustration du test de causalité de Granger dans le domaine fréquentiel entre le prix du  $\text{CO}_2$  et le commencement de la phase 2 du SEQE-UE. La relation de causalité n'est pas significative.

## Bibliographie

- Bai, J., & Perron, P. (2003). Computation and analysis of multiple structural change models. *Journal of applied econometrics*, 18(1), 1-22. <https://doi.org/10.1002/jae.659>
- Bai, Y., & Okullo, S. J. (2023). Drivers and pass-through of the EU ETS price: Evidence from the power sector. *Energy Economics*, 123, 106698. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106698>
- Breitung, J., & Candelon, B. (2006). Testing for short- and long-run causality: A frequency-domain approach. *Journal of Econometrics*, 132(2), 363–378. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2005.02.004>
- Breitung, J., & Schreiber, S. (2018). Assessing causality and delay within a frequency band. *Econometrics and Statistics*, 6, 57–73. <https://doi.org/10.1016/j.ecosta.2017.04.005>
- Candelon, B., & Hasse, J. (2023b). Testing for causality between climate policies and carbon emissions reduction. *Finance Research Letters*, 55, 103878. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2023.103878>
- Cludius, J., Galster, H., Healy, S., Noka, V., & Lam, L. (2022). The role of financial operators in the ETS market and the incidence of their activities in determining the allowances' price. *Publication for the committee on Industry, Research and Energy (ITRE)*. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2022/740052/IPOL\\_STU\(2022\)740052\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2022/740052/IPOL_STU(2022)740052_EN.pdf)
- Commission Européenne. (2020). Commission Decision (EU) 2020/2166. *EUR-Lex*. <http://data.europa.eu/eli/dec/2020/2166/oj>
- Commission Européenne. (s.d.). Système d'échange de quotas d'émission de l'UE (SEQE-UE). [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets\\_fr](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_fr)
- CREG. (2022). Study on the functioning of the European Union Emissions Trading Scheme and its impact on the wholesale electricity markets. <https://www.creg.be/sites/default/files/assets/Publications/Studies/F2408EN.pdf>
- Ellerman, A. D., & Buchner, B. K. (2007). The European Union Emissions Trading Scheme: origins, allocation, and early results. *Review of Environmental Economics and Policy*, 1(1), 66–87. <https://doi.org/10.1093/reep/rem003>
- Erbach, G., & Foukalová, N. (2023). Review of the EU ETS: 'Fit for 55' package. *Think Tank*. [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS\\_BRI\(2022\)698890](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2022)698890)
- Granger, C. W. J. (1969). Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. *Econometrica*, 37(3), 424. <https://doi.org/10.2307/1912791>

- ICAP (2019). The Use of Auction Revenue from Emissions Trading Systems.  
<https://icapcarbonaction.com/en/publications/use-auction-revenue-emissions-trading-systems>
- ICAP (2023). Emissions Trading Worldwide: Status Report 2023.  
<https://icapcarbonaction.com/en/publications/emissions-trading-worldwide-2023-icap-status-report>
- IEA. (2020). Implementing Effective Emissions Trading Systems: Lessons from international experiences. <https://www.iea.org/reports/implementing-effective-emissions-trading-systems>
- IEA. (2022). Enhancing China's ETS for Carbon Neutrality: Focus on Power Sector.  
<https://www.iea.org/reports/enhancing-chinas-ets-for-carbon-neutrality-focus-on-power-sector>
- IPCC. (2022). Synthesis report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6).  
[https://report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_SPM.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf)
- Koch, N., Fuss, S., Grosjean, G., & Edenhofer, O. (2014). Causes of the EU ETS price drop: Recession, CDM, renewable policies or a bit of everything?-New evidence. *Energy Policy*, 73, 676–685. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.06.024>
- Lovcha, Y., Perez-Laborda, A., & Sikora, I. (2022). The determinants of CO2 prices in the EU emission trading system. *Applied Energy*, 305, 117903.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117903>
- Marcu, A., Hernández, J. F., Romeo, G., Alberola, E., Faure, A., Obienu, C., . . . Schleicher, S. (2023). 2023 State of the EU ETS Report. *ERCST*. <https://ercst.org/2023-state-of-the-eu-ets-report/>
- Nordhaus, W. D. (2019). Climate change: the ultimate challenge for economics. *The American Economic Review*, 109(6), 1991–2014.  
<https://doi.org/10.1257/aer.109.6.1991>
- Parlement européen et conseil. (2023). Directive 2003/87/CE. *EUR-Lex*.  
<http://data.europa.eu/eli/dir/2003/87/2023-03-01>
- Parry, I. W. (2022). Carbon taxes or emissions trading Systems?: instrument choice and design. *Imfsg*. <https://doi.org/10.5089/9798400212307.066.A001>
- Sato, M., Rafaty, R., Calel, R., & Grubb, M. (2022). Allocation, allocation, allocation! The political economy of the development of the European Union Emissions Trading System. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 13(5).  
<https://doi.org/10.1002/wcc.796>

- Stoefs, W. (2022). EU ETS 101- A beginner's guide to the EU's Emissions Trading System. *Life, E.T.X.* <https://carbonmarketwatch.org/publications/eu-ets-101-a-beginners-guide-to-the-eus-emissions-trading-system/>
- Teixidó, J., Verde, S. F., & Nicolli, F. (2019). The impact of the EU Emissions Trading System on low-carbon technological change: The empirical evidence. *Ecological Economics*, 164, 106347. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.06.002>
- Verde, S. F. (2020). The impact of the EU emissions trading system on competitiveness and carbon leakage: the Econometric Evidence. *Journal of Economic Surveys*, 34(2), 320–343. <https://doi.org/10.1111/joes.12356>
- World Bank Group. (2023). *Carbon Pricing Dashboard*. Récupéré sur [https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/map\\_data](https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/map_data)

## Abstract

---

The Emissions Trading Scheme is a key tool in the European Union's climate policy. The aim of this carbon market is to reduce greenhouse gas emissions by requiring the actors involved to pay for their emissions through allowances. These allowances, limited in number by a cap, can be acquired in various ways at a price determined by the market.

This paper investigates the relationship between the changing phases of the European Union Emissions Trading Scheme and the price of carbon. The price of carbon, which has long been low, has recently risen sharply. A structural break analysis highlights the changes in the price regime, in particular with the transition to phase 4 in 2021. A Granger causality analysis in the frequency and time domain finds, in both cases, a significant Granger causality relationship between the price of CO<sub>2</sub> and the transition to phase 4.

## Résumé

---

Le Système d'échange de quotas d'émissions est un outil clé de la politique climatique de l'Union Européenne. Ce marché du carbone a pour but de réduire les émissions de gaz à effet de serre en imposant aux acteurs concernés de payer leurs émissions par l'intermédiaire de quotas. Ces derniers, limités en nombre par un plafond, peuvent être acquis de différentes manières à un prix déterminé par le marché.

Ce mémoire investigate la relation entre les changements de phases du Système d'échange de quotas d'émission de l'Union Européenne et le prix du carbone. Ce dernier, longtemps resté bas, a récemment connu une croissance marquée. Une analyse de rupture structurelle met en avant les changements de régime du prix, en particulier lors du passage à la phase 4 en 2021. Une analyse de causalité de Granger dans le domaine fréquentiel et temporel trouve, dans les deux cas, une relation de causalité de Granger significative entre le prix du CO<sub>2</sub> et le passage à la quatrième phase.

**UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN**  
Louvain School of Management

Place des Doyens, 1 bte L2.01.01, 1348 Louvain-la-Neuve  
Boulevard Emile Devreux 6, 6000 Charleroi, Belgique  
Chaussée de Binche 151, 7000 Mons, Belgique

[www.uclouvain.be/lsm](http://www.uclouvain.be/lsm)