

Louvain School of Management

Impact du marché européen du carbone sur les émissions de carbone entre des pays participants et non-participants

Auteur : Victor Fischer
Promoteur : Jean-Baptiste Hasse
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

Résumé

Au cours des dernières années, la lutte contre les émissions de carbone est devenue une préoccupation majeure. Dans cette optique, l'Union Européenne a mis en place en 2005 un système d'échange de quotas d'émissions (SEQE) pour atteindre ses objectifs de réduction. Cependant, l'efficacité de ce système suscite des interrogations. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail, visant à évaluer l'impact de l'adhésion au SEQE sur la réduction des émissions. Pour ce faire, la méthode des différences de différences est utilisée en comparant un groupe de pays participant au SEQE à un groupe de pays non participants. Les résultats suggèrent que le SEQE a contribué à une réduction des émissions de carbone, mais n'a pas eu d'effet significatif sur les émissions de protoxyde d'azote (N_2O).

Avant propos

Le présent travail de recherche a voulu faire le pont entre l'économie et l'écologie, deux domaines d'étude liés aux défis cruciaux du changement climatique. Ce mémoire s'inscrit ainsi dans la quête d'une meilleure compréhension des enjeux environnementaux et économiques.

La motivation pour entreprendre cette étude découle d'un intérêt pour les questions écologiques, et plus spécifiquement, pour les émissions de carbone qui sont au coeur des préoccupations actuelles. Ce sujet reste cependant assez flou et méconnu du public et c'est pour cette raison que j'ai souhaité m'y intéresser.

L'Union Européenne, en tant que précurseur en matière de politiques climatiques, a mis en place un système d'échange de quotas d'émissions (SEQE) de carbone. Dans cette perspective, j'ai analysé l'impact que ce système a sur les émissions de carbone de pays adhérents à ce système par rapport à des non-adhérents.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance envers mon promoteur de mémoire, Jean-Baptiste Hasse, dont l'expertise et les conseils éclairés ont été d'une valeur inestimable pour la réalisation de ce travail. Sa disponibilité et sa grande implication dans ce mémoire m'ont grandement aidé. Je remercie également mes proches pour leur soutien indéfectible tout au long de l'année.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Situation en Europe	1
1.2	Le marché européen du carbone	1
1.2.1	Introduction	1
1.2.2	Différentes phases	3
1.3	Les gaz à effet de serre	7
2	État de l'art	9
2.1	Critiques envers le Système d'Échange de Quotas d'Émissions (SEQE) . . .	9
2.2	Effets	10
2.2.1	Effets sur la productivité	10
2.2.2	Effets sur la compétitivité	11
2.2.3	Effets sur les fuites de carbone	11
2.3	Études utilisant la méthode différences de différences (DID)	12
2.3.1	Réduction d'émissions dans le Système d'Échange de Quotas d'Émissions (SEQE)	12
2.3.2	Impact du Système d'Échange de Quotas d'Émissions (SEQE) sur le secteur de l'aviation	13
2.4	Analyse de l'influence d'un système de taxe sur les émissions carbone de la Suède	13
2.4.1	Système de quotas en Chine	14
2.5	Causalité entre la réduction des émissions de carbone et la réduction des émissions de carbone	14
3	Méthodes	15
3.1	Choix des groupes	15
3.1.1	Critères de sélection	15
3.1.2	Récupération des données	16
3.2	Méthode différences de différences (DID)	17

4	Résultats	19
4.1	Émissions de carbone	19
4.1.1	Premier aperçu	19
4.1.2	Analyse statistique	20
4.2	Émissions de N ₂ O	22
4.2.1	Premier aperçu	22
4.2.2	Analyse statistique	22
5	Conclusion	24
	Références	26
A	Code	30

Table des figures

1.1	Prix d'un quota en €/t (2005-2022) (ALLA, 2023)	4
1.2	Sources humaines des émissions de dioxyde de carbone (CO ₂)	8
1.3	Sources humaines des émissions de N ₂ O	8
3.1	Explication graphique de la méthode Difference-in-Difference (« Difference-in-Difference Estimation », 2023)	17
4.1	Émissions de dioxyde de carbone (CO ₂) en fonction de la participation au Système d'Échange de Quotas d'Émissions (SEQE)	19
4.2	Somme des émissions de dioxyde de carbone (CO ₂) en fonction de la participation au Système d'Échange de Quotas d'Émissions (SEQE)	21
4.3	Émissions de N ₂ O en fonction de la participation au Système d'Échange de Quotas d'Émissions (SEQE)	22

Liste des tableaux

3.1	Groupe expérimental et contrôle avec le PIB/hab (en \$ US courant) (« World Bank Open Data », s. d.)	16
4.1	P-valeur de la méthode DID pour les émissions de carbone	20
4.2	Paramètres de la régression de la méthode DID pour les émissions de carbone	20
4.3	Paramètres de la régression de la méthode DID pour les émissions de N ₂ O	23

Abréviations

CO₂ dioxyde de carbone

DID différences de différences

GES Gaz à Effet de Serre

N₂O protoxyde d'azote

PFC perfluorocarbone

RSM réserve de stabilité du marché

SEQE Système d'Échange de Quotas d'Émissions

UE Union Européenne

Chapitre 1

Introduction

1.1 Situation en Europe

L'Union Européenne (UE) s'est engagée à réduire ses émissions de Gaz à Effet de Serre (GES), pour atteindre en 2050 la neutralité climatique, c'est à dire un équilibre entre ses émissions produites (par les industries, le transport,...) et ses émissions retirées de l'atmosphère (par les forêts, la capture directe de dioxyde de carbone (CO₂),...).

A plus court terme, l'objectif vise à réduire d'au moins 55% les émissions nettes pour 2030, en se basant sur les émissions de 1990 (Echos, 2021). En 2020, l'UE a fait baisser ses émissions de GES d'environ 34% par rapport à 1990 (Statista, 2023).

1.2 Le marché européen du carbone

1.2.1 Introduction

Pour accomplir cet objectif ambitieux, le Système d'Échange de Quotas d'Émissions (SEQE) de l'UE a été introduit le 1^{er} janvier 2005 par la Roumanie et les 25 pays membres de l'UE. Il se base d'ailleurs sur le protocole de Kyoto¹. Le SEQE est le premier système international à s'échanger des quotas (un quota vaut 1 tonne d'émission de GES (ALLA, 2023)). Il a pour but d'aider ses pays membres à diminuer leurs émissions de carbone. Cela concerne 11 000 installations fixes dans tous les secteurs, et couvre près de 45% des émissions de gaz à effet de serre de l'UE (Patrick, 2023) et 5% des émissions globales (Carella, 2021). Il est aussi appelé marché du carbone, même si d'autres gaz sont concernés.

1. Accord international signé en 1997 visant à réduire les émissions de GES

La participation au SEQE est obligatoire pour tous les secteurs émettant du CO₂, du protoxyde d'azote ainsi que du perfluorocarbone (PFC) gaz cités ci-dessus (voir section 1.2.2). Cela permet de contrôler directement la quantité de GES rejetée dans l'atmosphère. Cependant, certains secteurs bénéficient d'exceptions :

- Dans certains secteurs, seul les entreprises dépassant une certaine taille sont concernées
- Certaines entreprises peuvent ne pas y participer suite à certaines mesures fiscales ou autres, après une intervention gouvernementale
- Le secteur aérien : les vols d'obligation publique²

Pour garantir un bon fonctionnement de ce système, le SEQE s'appuie sur trois piliers fondamentaux. Premièrement, il se base sur un registre comptable reprenant les émissions et la conformité de chaque installation. Deuxièmement, sur un système de mesure de rapportage et de vérification des émissions s'assurant de l'exactitude des données et troisièmement, sur un règlement avec un système de pénalité.

Pour apporter une flexibilité, ce marché utilise le principe de plafonnement et d'échange. Ces principes incitent et encouragent tous ces exploitants à réduire leurs émissions, et à investir dans des technologies bas-carbone.

Le plafonnement consiste en un montant maximum de GES pouvant être émis par les membres de ce système. Afin de baisser les émissions globales, il est de plus en plus réduit chaque année (mais seulement à partir de la phase 3 du SEQE, voir 1.2.2).

Le principe d'échange quant à lui est divisé en deux sous-principes. La première est la mise en épargne de quotas, qui permet aux exploitants de garder des quotas non émis pour le futur, que ça soit pour prévenir une croissance de la production, ou comme anticipation d'un renforcement des règles.

La deuxième est l'emprunt de quotas, permettant d'acheter ou de vendre des quotas d'émission de GES. En effet, un assujetti ayant trop de quotas, sera autorisé à échanger ces quotas avec un autre assujetti. Vu que les émissions sont limitées, ils peuvent prendre de la valeur et auront donc un coût. Il permet aussi de lisser les prix sur le long terme.

Il existe deux marchés : le marché primaire, où les quotas sont mis aux enchères par les autorités publiques et le marché secondaire, où les acteurs peuvent s'échanger ces quotas (Patrick, 2023).

2. Depuis 2012, seul les vols dans l'Espace économique européen et les régions ultrapériphériques de l'UE sont concernés (« Aviation and the EU ETS », s. d.)

Ces quotas sont également mis aux enchères pour alimenter les fonds soutenant l'innovation dans les technologies à faible émission de carbone et la transition énergétique : le Fonds pour l'innovation et le Fonds pour la modernisation.

Concrètement, chaque exploitant doit avoir assez de quotas pour couvrir complètement toutes ses émissions sous peine de se voir infliger des amendes très lourdes. Si cet exploitant réduit ses émissions, il peut garder ses quotas restants pour ses besoins futurs ou bien les vendre sur le marché.

1.2.2 Différentes phases

Certains principes de base n'ont pas changé depuis la création du SEQE en 2005 : plafonnement des émissions et quotas alloués gratuitement (ou par enchères) aux installations des secteurs couverts par le SEQE. Ce système a cependant évolué au cours du temps, et on peut distinguer plusieurs phases (« Development of EU ETS (2005-2020) », s. d. ; « The EU Emissions Trading System : an Introduction | Climate Policy Info Hub », s. d.).

Première phase (2005-2007)

La première phase était une phase pilote, destinée à tester le système. Les États étaient libres de décider du nombre de quotas alloués au total et à chaque installation. La quasi-totalité des quotas a été attribuée gratuitement et concernait uniquement les émissions de CO₂, en se référant aux émissions passées. Pendant cette phase, tous les membres de l'UE à l'époque y participaient, et, étaient concernés : certaines activités énergétiques (pour la production d'électricité ou de chaleur) et les secteurs industriels à forte consommation d'énergie comme la sidérurgie, le raffinage de pétrole,... La pénalité en cas de non-respect était de 40€ par tonne de CO₂.

Grâce à cette première phase, il a été possible d'établir un prix pour les quotas d'émission, un registre de vérification et de surveillance des émissions réelles des installations au niveau national, ainsi que le libre-échange dans l'UE. Il est estimé que 200 millions de tonnes d'émission de CO₂ ont été évitées (3% des des émissions totales vérifiées). Les prix de ces quotas à travers les différentes phases est d'ailleurs disponible à la figure ci-dessous [1.1].

L'analyse des données a cependant révélé qu'un nombre trop grand de quotas avait été attribué aux entreprises, entraînant une offre excédentaire et, par effet domino, une chute conséquente de son prix, au point d'arriver à zéro en fin d'année 2007 (ce qui est expliqué aussi par le fait que les quotas de la première phase ne sont plus valides pour la deuxième phase). Des critiques ont émané, reprochant aux gouvernements nationaux de subir la pression des entreprises et demandant un régime plus strict.



FIGURE 1.1 – Prix d'un quota en €/t (2005-2022) (ALLA, 2023)

Deuxième phase (2008-2012)

Trois pays ont rejoint le SEQE pour la deuxième phase : la Norvège, le Liechtenstein et l'Islande. Suite aux critiques reçues, le système a évolué :

- Un plafond d'émission plus strict a été imposé, en réduisant le volume total des quotas de 6.5% par rapport à 2005
- L'oxyde nitreux ou protoxyde d'azote (N_2O) est aussi compté dans les émissions
- Les vols à l'intérieur des frontières des pays membres du SEQE rentrent dorénavant en compte
- Maximum 10% des quotas peuvent être mis aux enchères par les États membres, et ne sont plus alloués gratuitement
- Les entreprises sont autorisées à acheter des crédits internationaux
- La pénalité en cas de non-conformité passe de 40 à 100€ par tonne de CO_2
- Le système de registre et le journal des transactions est passé du niveau national au niveau de l'UE

La crise de 2008 a fait chuter les émissions de manière plus importante que prévu. Combiné avec des crédits supplémentaires ainsi que d'autres facteurs, comme les spéculations sur le prix des combustibles fossiles, il y a eu un important excédent de quotas, ce qui a

de nouveau fait chuter son prix et cela a pesé énormément tout au long de la phase 2. Les prix ont été tellement bas que The Economist, un célèbre magazine d'actualité hebdomadaire britannique, a jugé que cela n'inciterait pas les entreprises à réduire leurs émissions (« Phases 1 et 2 (2005-2012) », s. d.).

Selon les données de l'UE, les émissions ont été réduites de 3%, soit 50 millions de tonnes de CO₂, malgré l'achat de 80 millions de tonnes de compensation carbone.

Troisième phase (2013-2020)

La troisième phase du marché du carbone européen a été modifiée pour remédier à ses faiblesses et la rendre plus fiable et efficace. La Croatie a rejoint les rangs. Malheureusement, les résultats escomptés n'ont pas été atteints. Le système n'a pas été aussi rentable qu'anticipé et a été entaché par plusieurs fraudes et escroqueries.

Pour remédier à ces problèmes, les plafonds d'émission ont été harmonisés au niveau de l'UE, plutôt qu'au niveau national. De plus, ces plafonds sont progressivement réduits de 1,74% par an, dans le but de réduire les émissions de 21% d'ici 2020 par rapport à 2005. La portée du SEQE a également été élargie pour inclure de nouveaux secteurs et d'autres gaz à effet de serre. De plus, les pénalités imposées intègrent dorénavant l'inflation.

Une autre amélioration majeure est l'adoption des enchères comme méthode principale d'allocation des quotas, remplaçant ainsi les allocations gratuites basées sur des référentiels. Ces référentiels déterminent le nombre de quotas gratuits en fonction de la production (ou des intrants) de chaque installation, avec un référentiel spécifique pour chaque produit.

Un défi majeur de cette troisième phase concerne l'excédent considérable de quotas de la période précédente (environ 2 milliards). Cet énorme surplus a entraîné une baisse significative du prix des quotas. Afin de remédier à cette situation, l'UE a décidé de reporter la mise aux enchères de 900 millions de quotas.

De plus, la Commission européenne a proposé la création d'une réserve de stabilité du marché (RSM) de 12% des émissions annuelles vérifiées pour la prochaine période, qui permettra d'équilibrer automatiquement l'offre et la demande en ajustant le volume des enchères. Des millions de quotas ont été mis de côté dans la réserve afin de financer le déploiement de technologies innovantes en matière d'énergies renouvelables et de captage et de stockage du carbone.

Concrètement, lorsque le nombre de quotas en circulation n'est pas dans un intervalle choisi, il est ajusté. Si il y a trop de quotas sur le marché, des quotas seront ajoutés à la réserve et déduits des volumes mis aux enchères. A l'inverse, en cas de déficit important, les quotas

seront prélevés dans la réserve et ajoutés au futur volume mis aux enchères (« Création et fonctionnement d'une réserve de stabilité du marché pour le système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre de l'UE - Sénat », s. d. ; « Market Stability Reserve », s. d.).

À partir de 2013, plus de 40% des émissions vérifiées ont été mises aux enchères sur une plateforme accessible à tous les pays membres. Il est important de noter que ces enchères se déroulent au niveau national. Ce processus est supervisé par le règlement sur la mise aux enchères du SEQE, qui garantit la transparence et la non-discrimination. Ce règlement définit certains critères, tels que la prévisibilité, la rentabilité, l'accès équitable aux enchères et l'accès simultané aux informations pertinentes pour tous les opérateurs.

En 2019, l'introduction d'une réserve de stabilité a entraîné une augmentation des prix du carbone, ce qui a incité les entreprises à réduire leurs émissions de 9% (14,9% dans la production d'électricité et de chaleur, 1,9% dans l'industrie). En juillet 2020, la commission de l'environnement du Parlement européen a voté en faveur de l'inclusion des émissions de CO₂ du secteur maritime dans le système d'échange de quotas d'émission de l'UE.

Quatrième phase (2021-2030)

Nous sommes actuellement dans la quatrième phase du système d'échange de quotas d'émission de l'UE, lancée le 1er juillet 2021. L'objectif est de réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 43% d'ici 2030 par rapport aux niveaux de 2005. Pour atteindre cet objectif, la Commission européenne a mis en place plusieurs mesures interdépendantes.

Afin d'accélérer les réductions d'émissions, le nombre total de quotas d'émission diminuera annuellement de 2,2% à partir de 2021, par rapport au taux précédent de 1,74%.

Le système a été renforcé grâce à la RSM. Par exemple, entre 2019 et 2023, la quantité de quotas mis en réserve doublera pour représenter 24% des quotas en circulation. À partir de 2024, le taux d'alimentation régulier de 12% sera rétabli. De plus, à partir de 2023, le nombre de quotas détenus dans la réserve sera limité au volume des ventes aux enchères de l'année précédente, et les quotas excédentaires perdront leur validité.

Le système d'allocations gratuites sera prolongé et se concentrera sur les secteurs les plus susceptibles de délocaliser leur production dans un pays où les réglementations concernant les émissions sont plus laxistes. Pour déterminer le risque de fuite, deux critères sont choisis.

Le premier est le coût des achats de quotas (par rapport aux coûts totaux). Les secteurs qui émettent le plus de carbone ont un coût plus élevé par rapport aux autres, et donc un risque de fuite plus grand. Le deuxième est l'intensité commerciale du secteur (part des échanges

avec les pays tiers par rapport au chiffre d'affaire total). Les secteurs les plus exposés à la pression commerciale auront un risque plus important. En phase 4, un secteur est considéré comme étant à risque si le produit des deux critères est supérieur à 20% (Carella, 2021).

Pour les autres secteurs, l'allocation gratuite sera progressivement réduite après 2026 pour atteindre 0 à la fin de la phase. De plus, un nombre considérable de quotas gratuits sera réservé pour les nouvelles installations et celles en expansion. Des règles plus flexibles ont également été établies pour mieux aligner le niveau d'allocation gratuite sur les niveaux de production réels.

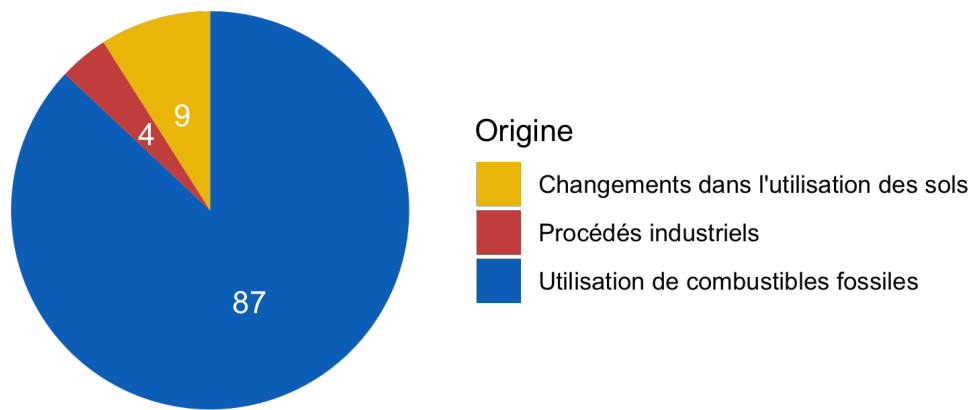
En ce qui concerne les secteurs industriels à forte intensité énergétique et le secteur de l'électricité, deux nouveaux fonds ont été créés pour les aider : le Fonds pour l'innovation, qui soutiendra les technologies innovantes et révolutionnaires, et le Fonds de modernisation, qui encouragera la modernisation et l'amélioration de l'efficacité énergétique.

De plus, l'allocation transitoire facultative et gratuite continuera à être disponible pour moderniser le secteur de l'énergie dans les États membres à faible revenu (« Revision for phase 4 (2021-2030) », s. d.).

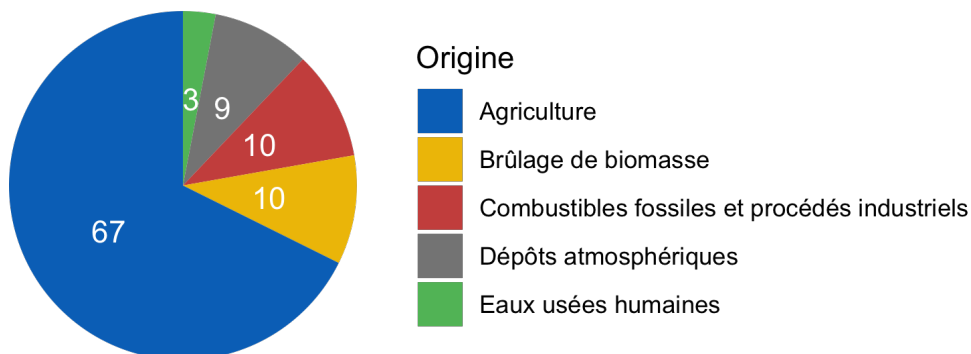
1.3 Les gaz à effet de serre

Comme mentionné précédemment, ce rapport porte sur l'analyse des émissions de divers GES dans le cadre du SEQUE. L'objectif principal est d'examiner, en utilisant la méthode statistique des différences de différences (DID) (difference in difference en anglais), les émissions de gaz de différents pays participants et non participants au SEQUE. Les résultats obtenus permettront de tirer des conclusions sur l'efficacité de ce système sur les émissions de GES des pays membres. Cependant, ce rapport n'étudiera que les 3 premières périodes. En effet, la période 4 a commencé en 2020, et les données ne sont disponibles que jusqu'en 2021, ne permettant pas une analyse avec suffisamment de recul.

Il y a d'abord le gaz à effet de serre probablement le plus connu : le dioxyde de carbone, plus connu sous le nom de CO₂. En effet, c'est un des gaz les plus répandus sur la planète et il participe activement à la respiration des êtres vivants ainsi qu'à la photosynthèse des plantes. C'est un gaz nécessaire à l'équilibre de la nature mais, en surabondance, il a un impact très nocif sur l'environnement. Il est relâché lors de procédés industriels, dans l'utilisation de combustibles fossiles (production d'électricité de chaleur, transport,...) et lors de changements dans l'utilisation des sols, comme par exemple le défrichage des forêts) (« Main sources of carbon dioxide emissions », s. d. ; Rédaction, 2022 ; « Système d'échange de quotas d'émission de l'UE (SEQUE-UE) », s. d.).

FIGURE 1.2 – Sources humaines des émissions de CO₂

Le deuxième gaz est le N₂O, connu aussi sous le nom de monoxyde de diazote, oxyde nitreux, protoxyde d'azote ou encore hémioxyde d'azote. Malgré qu'il soit moins connu, il est le troisième plus important gaz à effet de serre au monde, en contribuant à 5% des émissions de GES. Cependant, il a un potentiel de réchauffement global 298 fois supérieur à celui du CO₂ ! L'agriculture ainsi que la combustion de carburants, l'industrie chimique et la pollution routière sont les principales sources émettrices de ce gaz (Chrobak, 2022 ; Février, 2021 ; « Main sources of nitrous oxide emissions », s. d.).

FIGURE 1.3 – Sources humaines des émissions de N₂O

Un troisième gaz est aussi concerné par le SEQE : le PFC mais il ne sera pas étudié dans le cadre de ce rapport.

Le code des graphes ci-dessus est par ailleurs disponible à l'annexe A, en se basant sur les données récupérées (« Main sources of carbon dioxide emissions », s. d. ; « Main sources of nitrous oxide emissions », s. d.).

Chapitre 2

État de l'art

Dans cette section, des articles sont résumés afin de fournir un aperçu des travaux antérieurs sur ce sujet. Cela permet de situer ce travail dans le contexte actuel, tout en donnant les outils pour mieux le comprendre. Les idées clés, les concepts et les méthodologies développés par d'autres chercheurs y sont notamment introduits. De plus, les lecteurs pourront comprendre comment ce travail s'inscrit dans la continuité des travaux antérieurs.

2.1 Critiques envers le SEQE

A sa création en 2005, les dirigeants européens ont accordé une quantité trop importante de quotas aux industries européennes, afin d'éviter d'éventuels désavantages concurrentiels et de faire face aux incertitudes liées aux niveaux d'émissions de référence. Cet excès de quotas sur le marché a entraîné une chute des prix en 2007, incitant les entreprises à acheter des quotas supplémentaires plutôt que de réduire leurs émissions.

Une critique majeure du SEQE concerne le manque de cohérence entre les États membres, avec des critères d'allocation variant d'un pays à l'autre. Cette disparité a créé des inégalités et des désavantages concurrentiels entre les industries des différents pays participants, remettant en question l'équité du système.

Le SEQE a également été entaché de fraude et de manipulation d'émissions réelles, telles que la vente de quotas volés et la création de fausses réductions d'émissions. Ces pratiques ont sérieusement remis en question la crédibilité, l'intégrité et la fiabilité du système, soulignant la nécessité de renforcer les mécanismes de contrôle et de sanction.

De plus, le système du SEQE a été critiqué pour sa complexité administrative et son manque d'efficacité. Les acteurs impliqués dans le SEQE ont souvent rencontré des difficultés à comprendre les mécanismes du système, ce qui a entravé leur participation active et leur engagement dans la réduction des émissions.

Enfin, la volatilité des prix sur le marché des quotas d'émission a été compliquée à appréhender pour les entreprises, car elle rendait difficile la planification à long terme des investissements. Cette incertitude a créé des obstacles pour les entreprises cherchant à s'engager dans des réductions d'émissions à long terme (Betz & Sato, 2006 ; Feng et al., 2011 ; « Système d'échange de quotas d'émission de l'UE (SEQE-UE) », s. d. ; Venmans, 2012).

2.2 Effets

Malgré ces critiques, le SEQE a incité certaines entreprises à prendre des mesures pour réduire leurs émissions, bien que la réduction globale des émissions ait été limitée. Des améliorations ont vu le jour par rapport aux débuts et des progrès ont été réalisés, bien que certains problèmes (manque de cohérence entre les États membres, complexité administrative, la fraude et la manipulation, réductions d'émissions limitées) sont restés.

Les résultats ci-dessous sont néanmoins à prendre avec des pincettes, car les articles ne prennent pas tous en compte la flambée des prix du carbone sur le marché (voir graphe 1.1).

2.2.1 Effets sur la productivité

Une des préoccupations du SEQE est que ce n'est pas un système rentable, car cette réglementation engendre des coûts supplémentaires. Cependant, cette relation négative a été remise en cause par Porter dans les années 1990, qui stipule qu'une telle politique induit des gains d'efficacité car les entreprises bénéficient d'innovations ou de l'adoption d'une technologie plus efficace. En effet, les entreprises n'étant pas contraintes de prendre des risques en investissant dans la recherche, elles se reposent les unes sur les autres. Une réglementation encourage les entreprises à investir dans l'innovation, améliorant de facto la situation globale (Themann & Koch, 2021).

Des études examinent la productivité des entreprises et suggèrent que le SEQE n'a que peu d'effet en moyenne concernant la productivité des entreprises depuis son adoption. Toutefois, les résultats varient considérablement en fonction de plusieurs critères :

- Taille de l'entreprise : les effets sont plus favorables pour les plus grandes entreprises. En effet, les plus grandes entreprises ont pu répercuter l'augmentation de leurs coûts sur leur chaîne de valeur
- Productivité initiale : les entreprises plus éloignées de la frontière technologique¹

1. Elle est définie comme étant *productivité totale des facteurs la plus élevée pour chaque secteur, par année* (Themann & Koch, 2021)

s'en sortent moins bien que celles qui en sont proches. Pire, le SEQE peut même creuser encore plus les écarts

- Contraintes financières : les entreprises ayant une charge de dette plus importante sont davantage impactées
- Autres : secteur, pays

2.2.2 Effets sur la compétitivité

Avec l'entrée du SEQE dans le paysage européen, les entreprises ont eu peur de ne plus pouvoir être compétitives par rapport au reste du marché. Plusieurs études confirment que certains aspects n'ont eu qu'un impact très faible, qu'il soit positif ou négatif, basé sur plusieurs dimensions de la compétitivité (chiffre d'affaires, valeur ajoutée, emploi, bénéfices,...).

Par exemple, les résultats sur le chiffre d'affaires et la valeur ajoutée suggèrent un effet positif et significatif du SEQE lors des phases 2 et 3. Par contre, l'effet est négatif et significatif sur l'emploi lors de la phase 1, suggérant une réallocation de la force de travail, probablement vers des installations ou entreprises moins polluantes (Themann & Koch, 2021).

Cependant, aucune étude portant sur le long terme n'a été faite pour le moment.

2.2.3 Effets sur les fuites de carbone

Initialement, les premières phases du SEQE semblaient ne pas présenter de fuites de carbone², largement attribuées à la surallocation de quotas et à la baisse des prix (Verde, 2020). Cependant, des recherches plus récentes (Antoci et al., 2021 ; De Beule et al., 2022) suggèrent le contraire, en particulier à partir de la phase 3, où l'augmentation des prix a été identifiée comme un facteur clé.

Les études montrent que la décision de délocalisation des entreprises dépend davantage des politiques visant à réduire le coût des technologies vertes que des caractéristiques spécifiques du SEQE, telles que le plafond des émissions, le prix plancher ou le nombre de quotas accordés gratuitement. Il est important de noter que l'absence d'un système mondial de tarification du carbone contribue à cette fuite, ce qui pourrait entraîner des problèmes nationaux tels que des impacts sur la production et l'emploi, sans pour autant réduire les émissions globales.

2. Déplacement des industries émettrices de GES hors de la juridiction de l'UE

2.3 Études utilisant la méthode DID

La méthode utilisée dans ce rapport est la méthode de différences de différences (DID) ou doubles différences, qui sera expliquée en détail ultérieurement (3.2). Il s'agit d'une méthode statistique qui permet de calculer l'effet d'un traitement en comparant la différence entre un groupe recevant le traitement (dans ce cas, l'entrée dans le SEQE) et un groupe témoin avant et après l'introduction du traitement.

2.3.1 Réduction d'émissions dans le SEQE

Certains articles se basent sur le prix pour déterminer l'efficacité du SEQE (comme l'article (Lovcha et al., 2022)) mais, dans le cadre de ce travail, il est plus intéressant de se concentrer sur les éventuelles réductions d'émissions de carbone.

Une étude parue en 2023 (Bordignon & degl'Innocenti, 2023) a analysé l'efficacité du système dans la réduction des émissions de carbone entre la phase 2 et la phase 3 en utilisant une méthode des doubles différences (DID), mais en utilisant une manière différente que celle utilisée dans le cadre de ce mémoire. Les résultats ont montré une réduction significative des émissions entre la phase 2 et la phase 3 due à l'augmentation des quotas achetés. En effet, chaque quota d'émission acheté supplémentaire en phase 2 a entraîné une réduction d'environ une demi-tonne d'émissions vérifiées en phase 3. L'étude montre aussi que le SEQE a créé une incitation économique forte pour les entreprises à investir dans des technologies plus propres et à être plus respectueux de l'environnement.

La réduction totale des émissions de CO₂ pendant la phase 3 due à l'augmentation des quotas d'émission achetés est estimée entre -675 et -170 Mt, avec une estimation centrale de -422 Mt, soit 22,5% des émissions annuelles moyennes du SEQE.

De manière plus générale, le SEQE s'est avéré être un outil efficace pour contribuer à réduire les émissions. En effet, les groupes concernés ont réduit leurs émissions d'environ 35 % entre 2005 et 2021, en comparant les émissions provenant d'installations fixes en 2021, en excluant le Royaume-Uni, en prenant uniquement les producteurs d'électricité en Irlande du Nord, à une valeur ajustée des émissions de 2005 observant le même champ d'application (« Système d'échange de quotas d'émission de l'UE (SEQE-UE) », s. d.).

2.3.2 Impact du SEQE sur le secteur de l'aviation

Dans cette étude (Fageda & Teixidó, 2022), l'impact du SEQE sur les émissions de CO₂ dans le secteur de l'aviation est évalué. Les résultats montrent que malgré l'allocation gratuite de près de la moitié des quotas, le système a eu un effet significatif sur la croissance des services aériens dans l'Espace Économique Européen. Les compagnies aériennes à bas coûts ont été particulièrement touchées. Les émissions de CO₂ ont été réduites en encourageant la fermeture de certaines routes et en limitant la croissance du nombre de vols.

2.4 Analyse de l'influence d'un système de taxe sur les émissions carbone de la Suède

L'article (Andersson, 2019) examine l'efficacité des taxes sur le carbone dans la réduction des émissions de CO₂ de la Suède. Les taxes sur le carbone sont considérées comme un instrument potentiel pour inciter à la réduction des émissions, et l'objectif de l'étude est d'évaluer leur impact sur les émissions de CO₂.

Les auteurs évaluent l'effet causal des taxes sur le carbone sur les émissions de CO₂ en Suède. Ils comparent les évolutions des émissions avant et après l'introduction des taxes sur le carbone en Suède, en utilisant un groupe de contrôle composé d'autres pays similaires qui n'ont pas mis en place de taxes sur le carbone.

Pour créer un groupe de contrôle adéquat, les auteurs combinent les données de plusieurs pays du groupe de contrôle afin de construire une *Synthetic Sweden*, une version alternative de la Suède qui n'aurait pas de taxes sur le carbone. Cela permet de comparer les différences de changement dans les émissions de CO₂ entre la Suède réelle et cette version synthétique.

Les résultats de l'analyse suggèrent que les taxes sur le carbone ont contribué à réduire de manière significative les émissions de CO₂ en Suède. Les auteurs ont observé une diminution notable des émissions de CO₂ après l'introduction des taxes sur le carbone, par rapport à la tendance observée dans le groupe de contrôle.

2.4.1 Système de quotas en Chine

Depuis 2005, la Chine est le plus grand émetteur de carbone au monde. Dans le cadre de la lutte contre le changement climatique, elle a mis en place un système d'échange de quotas d'émissions de carbone similaire à celui de l'UE afin de réduire ses émissions.

Cette étude (Gao et al., 2020) a utilisé la méthode DID afin d'examiner l'efficacité de ce système dans la réduction des émissions de carbone et son impact sur les fuites de carbone. Les résultats montrent qu'il contribue à la réduction des émissions dans les régions pilotes et les industries concernées, en particulier pour les émissions basées sur la production. Cependant, des transferts d'émissions vers des régions non pilotes sont à signaler.

2.5 Causalité entre la réduction des émissions de carbone et la réduction des émissions de carbone

Cette étude (Candelon & Hasse, 2023) parue en 2023 utilise le test de causalité de Granger pour estimer l'impact de trois politiques climatiques sur la réduction des émissions de carbone entre 1964 et 2021 de la Suède.

Les résultats montrent que la mise en place d'une taxe carbone en Suède a un impact significatif à long terme sur la réduction des émissions de carbone domestiques tandis que le protocole de Kyoto n'a pas démontré d'effet significatif sur les émissions de carbone dans le pays.

Ces résultats mettent en avant une solution : les mesures incitatives telles qu'une taxe carbone, toujours le but de réduire les émissions de carbone.

Chapitre 3

Méthodes

3.1 Choix des groupes

Pour voir l'impact de la participation (ou non) dans le marché européen du carbone, une comparaison sera faite entre le groupe contrôle (ceux qui ne participent pas à ce marché) et le groupe expérimental (ceux qui sont rentrés dans ce marché).

3.1.1 Critères de sélection

Il est donc nécessaire de trouver des pays faisant partie du groupe contrôle et d'autres pour le groupe expérimental. Pour qu'un pays rentre dans un groupe, un pays "équivalent" pour l'autre était requis. Pour cela, deux critères ont été choisis : le PIB par habitant (PIB/hab) et un critère plus objectif. Ce dernier critère était basé à la fois par la proximité géographique (pour que les pays ne soient pas trop éloigné géographiquement) et la ressemblance.

Le critère de la ressemblance était utile si deux pays étaient assez semblables par rapport à un pays au niveau du PIB/hab. Par exemple, la Suisse n'étant pas rentré dans ce système, deux pays se détachaient basé sur le critère de PIB/hab : l'Allemagne et le Luxembourg. Grâce à ce critère de ressemblance, le Luxembourg a été choisi car il possède des caractéristiques économiques (et autres) semblables à la Suisse (« Comparaison entre pays : Suisse / Luxembourg », s. d.). En appliquant cette logique, voici les 6 pays sélectionnés avec leur PIB/hab entre parenthèses (en \$ US courant) (« World Bank Open Data », s. d.) :

<i>Groupe contrôle</i>	<i>Groupe expérimental</i>
Norvège (89.154)	Suède (61.028)
Russie (12.194)	Pologne (17.999)
Suisse (91.991)	Luxembourg (133.590)
Turquie (9.661)	Bulgarie (12.221)
Islande (68.727)	Danemark (68.007)
Serbie (9.230)	Roumanie (14.858)

TABLE 3.1 – Groupe expérimental et contrôle avec le PIB/hab (en \$ US courant) (« World Bank Open Data », s. d.)

Il faut cependant nuancer en disant que les pays du groupe contrôle font aussi des efforts pour réduire leurs émissions de carbone. D'ailleurs, la Suisse possède un système similaire de quotas d'émissions de carbone depuis 2013 (De L'environnement Ofev, s. d.).

3.1.2 Récupération des données

La première variable étudiée dans ce rapport est les émissions de CO₂ émises par habitant (CO₂/hab) sur un an, exprimées en tonnes (t) (Ritchie & Roser, 2020). Ces données empiriques s'étalent sur une période allant de 1950 à 2021. La période peut sembler courte, mais les données n'ont pas été récoltées à partir de la même date dans chaque pays. En effet, l'année de départ choisie est l'année à partir de laquelle tous les pays ont des données, sans qu'il y ait une année avec des données manquantes.

La période de pré-traitement s'étale donc de 1950 à 2004, soit 54 années tandis que la période de post-traitement s'étale de 2005 à 2021, soit 16 années. La période de post-traitement est suffisamment grande pour construire un modèle viable et pour évaluer les effets des changements de la politique.

Les émissions de N₂O sont quant à elle exprimées en tonnes d'équivalents CO₂ émises par habitant sur un an. Les données s'étalent aussi de 1950 à 2021 (Ritchie et al., 2020).

Les données étudiées sont contenues dans une table de données avec 3 colonnes : Country, Year et Emissions. Chaque ligne contiendra donc une émission pour un pays pour une année précise.

Le code est par ailleurs disponible à l'annexe A.

3.2 Méthode DID

La méthode des différences en différences (DID) est une technique statistique visant à estimer un effet causal, en donnant une estimation de ce qui se serait produit dans le groupe de traitement en l'absence du traitement. Dans notre cas, c'est l'impact de l'entrée sur le marché du carbone européen. Pour cela, elle va reproduire un design de recherche expérimentale à partir de données d'études qu'on peut observer en étudiant l'effet différentiel d'un traitement sur un groupe expérimental par rapport à un groupe de contrôle.

Concrètement, cette méthode calcule l'effet d'un traitement sur un résultat. Pour cela, elle va comparer les changements des résultats dans le temps entre le groupe de traitement et le groupe de contrôle. Bien qu'elle vise à atténuer les effets de certains facteurs et des biais de sélection, cette méthode peut encore être soumise à certains biais (par exemple, régression vers la moyenne, causalité inversée et biais de variable omise).

La méthode des différences en différences est particulièrement utile dans les situations où il est difficile, voire impossible, de mettre en place une expérience aléatoire contrôlée (ici, impossible de simuler les émissions de carbone du Luxembourg si il était pas rentré dans le marché¹). Elle permet d'obtenir une estimation de l'effet causal en exploitant les variations naturelles observées dans les données longitudinales.

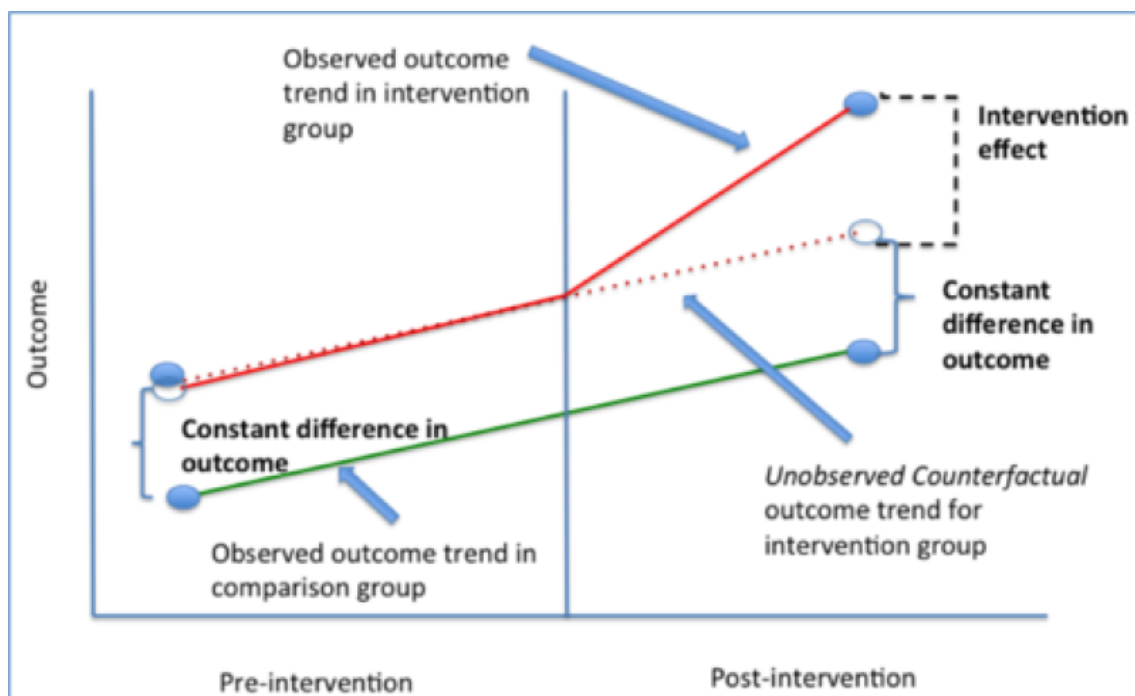


FIGURE 3.1 – Explication graphique de la méthode Difference-in-Difference (« Difference-in-Difference Estimation », 2023)

1. Actuellement, grâce aux travaux de Abadie, c'est possible mais cela sort du cadre de ce travail (Abadie et al., 2014)

La méthode des différences en différences nécessite des données mesurées à partir d'un groupe de traitement et d'un groupe de contrôle à deux moments temporels ou plus, spécifiquement au moins un moment avant le « traitement » et au moins un moment après le « traitement ». Elle calcule donc la différence « normale » dans la variable de résultat entre les deux groupes. En d'autres mots, elle calcule la différence qui existerait toujours si aucun groupe n'avait subi le traitement. La figure 3.1 illustre de manière graphique l'application de cette méthode des différences en différences (Chrobak, 2022 ; « Difference-in-Difference Estimation », 2023).

Dans le cadre de ce mémoire, la méthode des différences en différences se basera sur la méthode expliquée ici : (Torres-Reyna, 2015). Elle va appliquer une régression linéaire à 2 variables multipliées entre elles : `treated` et `time`. Le vecteur `time` est utilisé pour indiquer quand commence le traitement : `time` vaudra 1 à partir de l'année où commence le traitement, 0 sinon. Le vecteur `treated` indiquera si le pays est exposé au traitement, dans notre cas l'entrée dans le SEQE. Pour cela, `treated` vaudra 1 pour les pays exposés au traitement, 0 sinon.

Le code est par ailleurs disponible à l'annexe A.

Chapitre 4

Résultats

4.1 Émissions de carbone

4.1.1 Premier aperçu

Lorsqu'on met sur un seul graphe les émissions de carbone de tous les pays en fonction de leur participation ou non au SEQE, on obtient le graphe 4.1. La ligne noire verticale est en 2005, l'année de l'entrée en vigueur du SEQE.

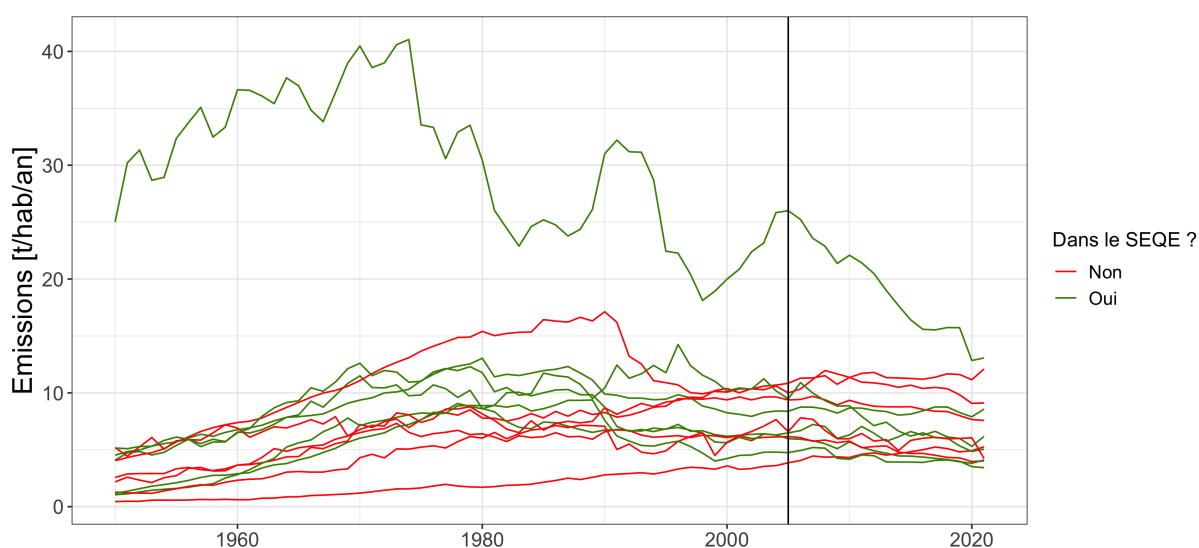


FIGURE 4.1 – Émissions de CO₂ en fonction de la participation au SEQE

A première vue, il semble que tous les pays membres du SEQE ont fait des efforts suffisants pour que leurs émissions de GES soient sur une pente descendante. A l'inverse, les pays non membres ne semblent pas tous être sur une pente descendante et au contraire, certains pays sont mêmes sur une pente ascendante.

4.1.2 Analyse statistique

Pour interpréter les résultats, nous utilisons la méthode des différences en différences, expliquée précédemment (section 3.2). Les résultats sont présentés dans le tableau 4.1, accompagnés des p-valeurs. La p-valeur indique la probabilité d'obtenir des résultats aussi extrêmes, voire plus extrêmes, que ceux observés. Une p-valeur plus petite suggère un rejet de l'hypothèse qui stipule qu'il n'y a aucune différence significative entre les pays des deux groupes.

Les symboles indiquent la signification statistique des résultats, tandis que les chiffres représentent leur degré de significativité. De nouveau, au plus le chiffre est petit, au plus l'effet est significatif. Il est important de noter que ces résultats statistiques ont des limites et ne permettent pas de tirer des conclusions définitives sur la causalité ou l'importance réelle des effets observés (Bevans, 2023).

	Participant	Temps	Traitement
2005	<2e-16 ***	0.0335 *	1.21e-05 ***
2008	<2e-16 ***	0.0781 .	2.46e-05 ***
2013	<2e-16 ***	0.258720	0.000284 ***

TABLE 4.1 – P-valeur de la méthode DID pour les émissions de carbone

(a) Signification : '***' = 0.001, '**' = 0.005, '.' = 0.1, '.' = 1

La colonne "Participant" nous indique que les pays participants au SEQE émettent significativement plus d'émissions de carbone (comme en atteste le tableau des paramètres de la régression 4.2), et on peut voir que c'est très significatif. Les paramètres indiquent l'effet sur l'évolution des émissions de carbone au fil du temps, ce qui permet d'évaluer l'impact du SEQE.

	Participant	Temps	Traitement
2005	5.1836	1.5509	-4.5322
2008	5.0251	1.3787	-4.6886
2013	4.7172	1.0592	-4.8301

TABLE 4.2 – Paramètres de la régression de la méthode DID pour les émissions de carbone

Cette conclusion peut être vérifiée par le graphique 4.2, où l'on observe que les émissions des pays participants au SEQE sont supérieures à celles des pays non-participants de 2005 à 2021.

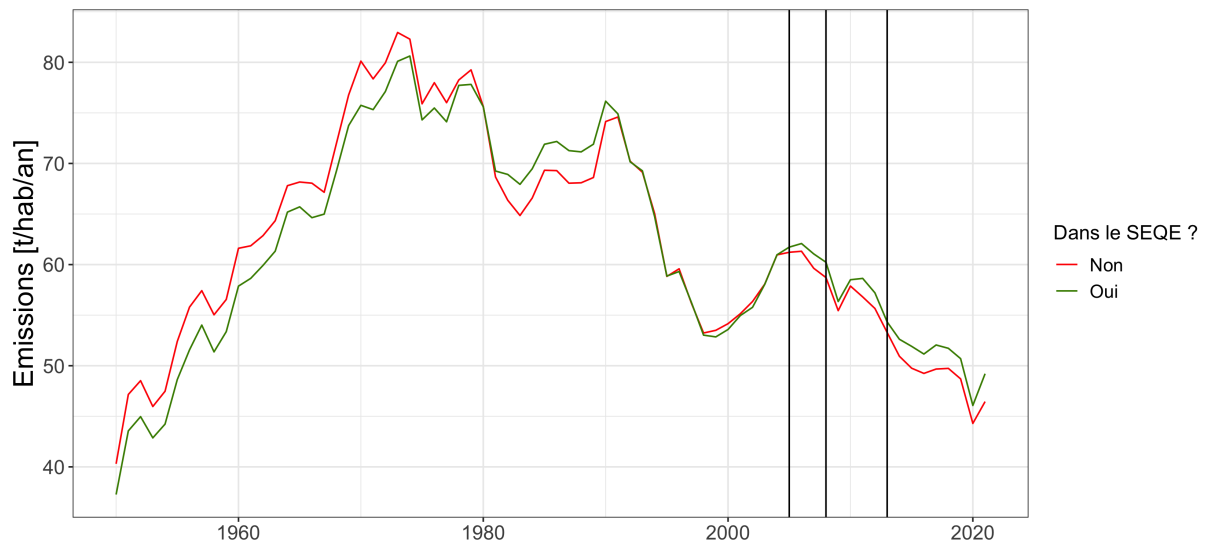


FIGURE 4.2 – Somme des émissions de CO₂ en fonction de la participation au SEQUE

La colonne "Temps" du tableau 4.1 révèle un effet significatif (et positif) sur les émissions en 2005 mais que cet effet n'est plus statistiquement présent par après (car la p-valeur est supérieure à 0.05). Cela suggère que l'impact de l'entrée sur le marché du carbone varie en fonction de l'année.

En résumé, ces résultats indiquent une interaction significative entre la participation au marché du carbone européen et le temps pour ce qui concerne les émissions de carbone. Les pays participants ont montré une diminution statistiquement significative de leurs émissions de carbone au fil du temps par rapport aux pays non-participants. Cela suggère qu'entrer sur le marché du carbone européen a un effet bénéfique sur la réduction des émissions de carbone.

4.2 Émissions de N₂O

4.2.1 Premier aperçu

Le graphe des émissions de N₂O 4.3 ne sont pas à la même échelle que celles du CO₂. A la figure 4.1, les émissions de carbone étaient entre 0 et 40 tonnes tandis que le N₂O ne présente que des émissions vont entre 0 et 2.5 de tonnes équivalent CO₂. La ligne noire verticale est en 2008, l'année de l'entrée en vigueur du N₂O dans le SEQE. Il est plus difficile de tirer une conclusion en fonction de l'entrée ou non dans le SEQE mais on remarque que d'une manière générale, une grande partie a réduit ses émissions de N₂O à partir de 2008.

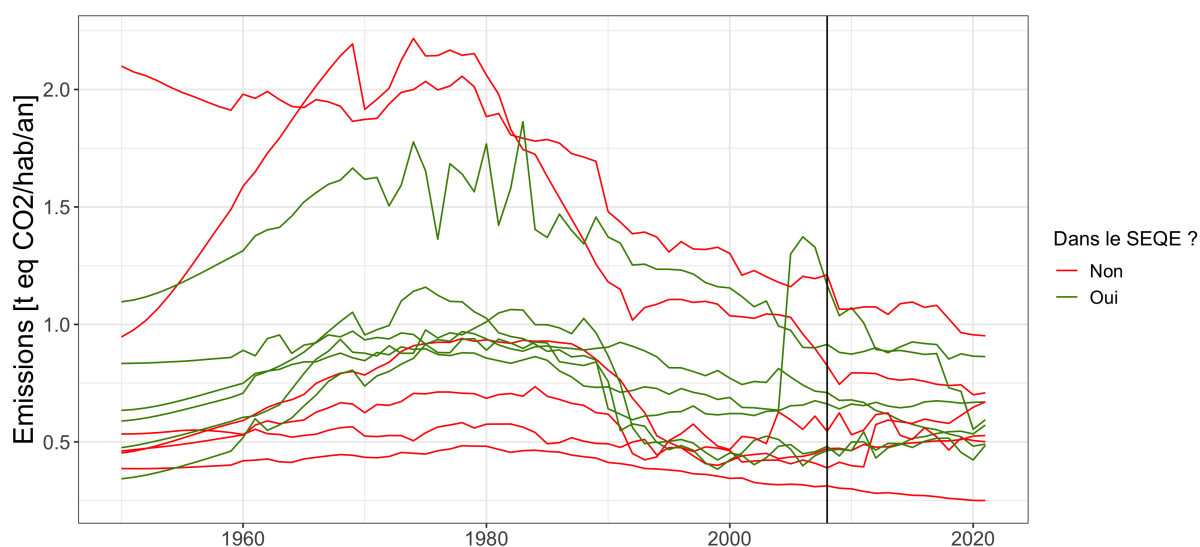


FIGURE 4.3 – Émissions de N₂O en fonction de la participation au SEQE

4.2.2 Analyse statistique

Comme pour le carbone (4.1.2), procédons maintenant à un test statistique pour vérifier quels sont les effets du SEQE sur les émissions de N₂O.

Les résultats de la première colonne du tableau 4.3 indiquent qu'il n'y a aucune différence statistique significative dans les émissions de N₂O entre les pays participants et non-participants au marché du carbone européen en 2008 et en 2013. Cela suggère que l'entrée sur le marché du carbone européen n'a pas eu d'impact significatif sur les émissions de N₂O entre ces deux groupes de pays.

	Participant	Temps	Traitement
2008	0.179	1.25e-08 ***	0.176
2013	0.297	1.4e-05 ***	0.439

TABLE 4.3 – Paramètres de la régression de la méthode DID pour les émissions de N₂O

(a) Signification : '***' = 0.001, ' ' = 1

La deuxième colonne révèle un effet significatif de la variable "Temps" sur les émissions de N₂O. Les paramètres de "Temps" pour 2008 et 2013 (-0.29274 et -0.26889 respectivement) indiquent statistiquement que les émissions par habitant ont tendance à diminuer au fil du temps. Cette observation confirme l'impression visuelle du graphique 4.3 des émissions de N₂O.

En résumé, ces résultats pour les années 2008 et 2013 ne fournissent pas suffisamment de preuves statistiques pour conclure de manière définitive qu'il y a eu un effet significatif de l'entrée sur le marché du carbone européen sur les émissions de N₂O des pays participants pendant la période étudiée.

Chapitre 5

Conclusion

Comme l'explique William Nordhaus (Nordhaus, 2019), le changement climatique est une externalité négative mondiale ainsi qu'un *défi ultime* pour les économistes. Il souligne l'importance de la gestion commune des externalités mondiales, car les actions individuelles ne peuvent pas résoudre ce problème. Il nécessite une action concertée des pays majeurs, comme le système d'échange de quotas d'émissions (SEQE).

Les résultats présentés dans ce travail mettent en évidence l'impact significatif de la participation au SEQE sur la réduction des émissions de carbone. Cependant, il est important de noter que les émissions d'oxyde nitreux n'ont pas connu une réduction significative, ce qui souligne la nécessité de poursuivre les efforts pour atteindre pleinement les objectifs de réduction des émissions.

Ces résultats sont importants dans le contexte plus large de la lutte contre le changement climatique. La participation au SEQE a permis aux pays concernés de réaliser des progrès significatifs dans la réduction des émissions de carbone par rapport aux pays non concernés. Il faut néanmoins noter que de nombreuses incertitudes persistent quant à ces analyses, comme le souligne Geoffrey Heal (Heal, 2017).

Cependant, il convient de reconnaître que ce travail demeure incomplet et qu'il existe des possibilités d'amélioration. Un plus grand échantillon de pays étudiés ou une analyse plus approfondie en incluant davantage de variables explicatives pourrait fournir des informations supplémentaires. De plus, l'utilisation d'approches méthodologiques telles que les travaux d'Abadie (Abadie et al., 2014), permettant de simuler des groupes de contrôle synthétiques, pourrait contribuer à une évaluation plus précise de l'efficacité du SEQE.

En conclusion, il est essentiel de continuer à étudier et à évaluer les politiques de réduction des émissions telles que le marché du carbone européen afin de guider efficacement les actions futures visant à lutter contre le changement climatique. Cette étude fournit des indications mais souligne également la nécessité de poursuivre les efforts pour atteindre l'objectif de neutralité carbone.

Références

- Abadie, A., Diamond, A., & Hainmueller, J. (2014). Comparative Politics and the Synthetic Control Method. *American Journal of Political Science*, 59(2), 495–510. <https://doi.org/10.1111/ajps.12116>
- ALLA, A. (2023). Quel effet du marché carbone européen sur la productivité des entreprises ? <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/5e2dc030-70c9-461d-8106-5bb9cbdc1836/files/7038348a-80b6-408a-b767-59674e6c90bb>
- Andersson, J. J. (2019). Carbon Taxes and CO2 Emissions: Sweden as a Case Study. *American Economic Journal: Economic Policy*, 11(4), 1–30. <https://doi.org/10.1257/pol.20170144>
- Antoci, A., Borghesi, S., Iannucci, G., & Sodini, M. (2021). Should I stay or should I go? Carbon leakage and ETS in an evolutionary model. *Energy Economics*, 103, 105561. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105561>
- Aviation and the EU ETS. (n.d.). https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-green-deal/delivering-european-green-deal/aviation-and-eu-ets_en
- Betz, R. C., & Sato, M. (2006). Emissions trading: lessons learnt from the 1st phase of the EU ETS and prospects for the 2nd phase. *Climate Policy*, 6(4), 351–359. <https://doi.org/10.1080/14693062.2006.9685607>
- Bevans, R. (2023). Understanding P Values | Definition and examples. *Scribbr*. <https://www.scribbr.com/statistics/p-value/#:~:text=What%20exactly%20is%20a%20p,statistical%20test%20using%20your%20data.>
- Bordignon, M., & degl’Innocenti, D. G. (2023). Third Time’s a Charm? Assessing the Impact of the Third Phase of the EU ETS on CO2 Emissions and Performance. *Sustainability*, 15(8), 6394. <https://doi.org/10.3390/su15086394>
- Candelon, B., & Hasse, J.-B. (2023). Testing for causality between climate policies and carbon emissions reduction. *Finance Research Letters*, 103878.
- Carella, C. (2021). EU Emission Trading System (EU ETS). *Florence School of Regulation*. <https://fsr.eui.eu/eu-emission-trading-system-eu-ets/>
- Chrobak, U. (2022). The world’s forgotten greenhouse gas. <https://www.bbc.com/future/article/20210603-nitrous-oxide-the-worlds-forgotten-greenhouse-gas>
- Comparaison entre pays: Suisse / Luxembourg. (n.d.). <https://www.donneesmondiales.com/comparaison-pays.php?country1=CHE&country2=LUX>

- Création et fonctionnement d'une réserve de stabilité du marché pour le système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre de l'UE - Sénat. (n.d.). <https://www.senat.fr/ue/pac/EUR000000082.html>
- De Beule, F., Schoubben, F., & Struyfs, K. (2022). The pollution haven effect and investment leakage: The case of the EU-ETS. *Economics Letters*, *215*, 110536. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2022.110536>
- De L'environnement Ofev, O. F. (n.d.). Système d'échange de quotas d'émission pour les exploitants d'installations. [https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/info-specialistes/mesures-reduction/seqe/installations.html#:~:text=La%20Suisse%20a%20introduit%20le,%27Union%20europ%C3%A9enne%20\(UE\).](https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/info-specialistes/mesures-reduction/seqe/installations.html#:~:text=La%20Suisse%20a%20introduit%20le,%27Union%20europ%C3%A9enne%20(UE).)
- Development of EU ETS (2005-2020). (n.d.). [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/development-eu-ets-2005-2020_en#:~:text=Phase%201%20\(2005%2D2007\),-This%20was%20a&text=Covered%20only%20CO2%20emissions,was%20%E2%82%AC40%20per%20tonne](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/development-eu-ets-2005-2020_en#:~:text=Phase%201%20(2005%2D2007),-This%20was%20a&text=Covered%20only%20CO2%20emissions,was%20%E2%82%AC40%20per%20tonne)
- Difference-in-Difference Estimation. (2023). <https://www.publichealth.columbia.edu/research/population-health-methods/difference-difference-estimation>
- Echos, L. (2021). Climat : l'UE adopte l'objectif de réduire ses émissions carbone de moitié d'ici à 2030. <https://www.lesechos.fr/monde/europe/climat-lue-adopte-lobjectif-de-reduire-ses-emissions-carbone-de-moitie-dici-a-2030-1308603>
- Fageda, X., & Teixidó, J. (2022). Pricing carbon in the aviation sector: Evidence from the European emissions trading system. *Journal of Environmental Economics and Management*, *111*, 102591. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2021.102591>
- Feng, Z.-H., Zou, L.-L., & Wei, Y.-M. (2011). Carbon price volatility: evidence from eu ets. *Applied Energy*, *88*(3), 590–598. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191000231X>
- Février, H. (2021). Réchauffement climatique : le N2O, l'autre gaz à effet de serre. <https://information.tv5monde.com/international/rechauffement-climatique-le-n2o-lautre-gaz-effet-de-serre-23451#b>
- Gao, Y., Li, M., Xue, J., & Liu, Y. (2020). Evaluation of effectiveness of china's carbon emissions trading scheme in carbon mitigation. *Energy Economics*, *90*, 104872.
- Heal, G. (2017). The economics of the climate. *Journal of Economic Literature*, *55*(3), 1046–1063. <https://doi.org/10.1257/jel.20151335>
- 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>
- Main sources of carbon dioxide emissions. (n.d.). <https://whatsyourimpact.org/greenhouse-gases/carbon-dioxide-emissions>
- Main sources of nitrous oxide emissions. (n.d.). <https://whatsyourimpact.org/greenhouse-gases/nitrous-oxide-emissions>

- Market Stability Reserve. (n.d.). https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/market-stability-reserve_en
- 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>
- Patrick, C. (2023). Marchés du carbone. *Ministères Écologie Énergie Territoires*. <https://www.ecologie.gouv.fr/marches-du-carbone>
- Phases 1 et 2 (2005-2012). (n.d.). https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/development-eu-ets-2005-2020_fr
- Rédaction, L. (2022). CO₂ : qu'est-ce que le dioxyde de carbone ? <https://www.geo.fr/environnement/co2-quest-ce-que-le-dioxyde-de-carbone-193560#:~:text=CO2%20%3A%20d%C3%A9finition,%C3%A9ment%20crucial%20de%20ce%20cycle>.
- Revision for phase 4 (2021-2030). (n.d.). https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/revision-phase-4-2021-2030_en
- Ritchie, H., & Roser, M. (2020). Co emissions [<https://ourworldindata.org/co2-emissions>]. *Our World in Data*.
- Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. (2020). Co and greenhouse gas emissions [<https://ourworldindata.org/and-greenhouse-gas-emissions>]. *Our World in Data*.
- Statista. (2023). Total greenhouse gas emissions in the EU 1990-2020. <https://www.statista.com/statistics/780410/total-greenhouse-gas-emissions-european-union-eu/#:~:text=Since%201990%2C%20EU%20GHG%20emissions%20have%20fallen%20by%2034%20percent>.
- Système d'échange de quotas d'émission de l'UE (SEQE-UE). (n.d.). https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_fr
- The EU Emissions Trading System: an Introduction | Climate Policy Info Hub. (n.d.). <https://climatepolicyinfohub.eu/eu-emissions-trading-system-introduction.html>
- Themann, M., & Koch, N. (2021). Catching up and falling behind: Cross-country evidence on the impact of the EU ETS on firm productivity. *Resource and Energy Economics*, 69, 101315. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2022.101315>
- Torres-Reyna, O. (2015). Differences-In-Differences (using R). <https://www.princeton.edu/~otorres/DID101R.pdf>
- Venmans, F. (2012). A literature-based multi-criteria evaluation of the EU ETS. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5493–5510. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.036>
- 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 Open Data. (n.d.). https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/NY.GDP.PCAP.CD?end=2021&name_desc=false&start=1960&view=chart

Annexe A

Code

Le code est disponible ici : <https://github.com/PingPong04/Code.git>

```
1 #Packages utilises
2 library(tibble)
3 library(tidyr)
4 library(dplyr)
5 library(stats)
6 library(ggplot2)
7
8 #Chemin vers les donnees depuis mon ordinateur
9 setwd("/Users/victorfischer/Desktop/Q12/Me moire/code")
10
11 #Recuperer les bases de donnees
12 dataN02 <- read.csv("per-capita-nitrous-oxide.csv")
13 dataCarbon <- read.csv("co-emissions-per-capita.csv")
14
15 #Liste des pays etudies
16 listePays=c("Norway", "Sweden", "Russia", "Poland", "Switzerland", "
17             Luxembourg", "Turkey", "Bulgaria", "Iceland", "Denmark", "Serbia", "
18             Romania")
19
20
21 taille=72 #minimum de colonnes parmi listePays, pour qu'il y ait les
22           memse annees pour tout le monde
23
24
25 #Le nom du label pour les ordonnees (va servir pour les graphes)
26 #ylabel="Emissions [t eq CO2/hab/an]"
27 #ylabel="Emissions [t/hab/an]"
28
29 #filtre est une fonction qui prend une base de donnees en argument et
30   renvoie les 72 derniers elements (en fonction de taille)
31 #Elle est utilisee dans clean
32 filtre = fonction(data){
33   if(nrow(data)-taille==0){
```



```

68         data$Country == "Bulgaria" |
69         data$Country == "Denmark" |
70         data$Country == "Romania", 1,0)
71
72     didreg = lm(Emissions ~ treated*time, data = data) #Regression en tant
       que telle
73     print(summary(didreg))
74 }
75
76 #plotSum est une fonction donnant la somme des emissions des 2 groupes
       sur le meme graphe, avec name le nom du fichier contenant le graphe
77 plotSum=function(data, name){
78     m=matrix(nrow = taille, ncol=2)
79     for(i in 1:taille){
80         medIn=c()
81         medOut=c()
82         for (j in 1:6){
83             medOut=c(medOut,data[(j*taille)+i,3])
84             medIn=c(medIn,data[((j+1)*taille)+i,3])
85         }
86         m[i,1]=sum(medOut)
87         m[i,2]=sum(medIn)
88     }
89     #Data.frame contenant toutes les donnees
90     dataMedian=data.frame(Country=c(rep("Non", taille), rep("Oui", taille)
91         ),
92         Year=c(rep(1950:2021,2)),
93         Emissions=c(m[,1], m[,2]))
94
95     #Graphe avec ses options
96     g2=ggplot(data = dataMedian) +
97         aes(x=Year,y=Emissions,color=Country) +
98         ylab(ylabel) +
99         geom_line() +
100        scale_color_manual(values = c("red", "chartreuse4")) +
101        theme_bw() +
102        theme(axis.title.x=element_blank()) +
103        geom_vline(xintercept = 2005, color="black") +
104        geom_vline(xintercept = 2008, color="black") +
105        geom_vline(xintercept = 2013, color="black") +
106        labs(color = "Dans le SEQE ?") +
107        theme(
108            axis.title = element_text(size = 18),
109            axis.text = element_text(size = 13),
110            legend.title = element_text(size = 13),
111            legend.text = element_text(size = 12),

```

```

112   print(g2)
113   ggsave(name, plot=last_plot(), width=11, height = 5) #sauver le graphe
114 }
115
116 #plotGraphs est une fonction non-utilisee dans ce rapport mais qui
    permet de comparer les emissions d'un pays face a son equivalent
117 plotGraphs=function(data){
118   for (i in 1:6){
119     #Graphes avec ses options
120     g2 = ggplot(data = data[(2*(i-1)*taille+1):(2*i*taille),]) +
121       aes(x = Year, y = Emissions, color = Country) +
122       ylab(ylabel) +
123       scale_color_manual(values = c("red", "chartreuse4")) +
124       geom_line() +
125       theme_bw() +
126       theme(axis.title.x=element_blank()) +
127       geom_vline(xintercept = 2005, color="black")
128     print(g2)
129   }
130 }
131 #plotGraphs(dataN02)
132
133 #plotOneGraphs est une fonction renvoyant les emissions de tous les pays
    en fonction de leur groupe, avec name le nom du fichier contenant le
    graphe
134 plotOneGraphs=function(data, name){
135   data$treated = ifelse(data$Country == "Sweden" |
136                         data$Country == "Poland" |
137                         data$Country == "Luxembourg" |
138                         data$Country == "Bulgaria" |
139                         data$Country == "Denmark" |
140                         data$Country == "Romania", "Oui", "Non")
141   #Graphe avec ses options
142   g2 <- ggplot(data = data) +
143     aes(x = Year, y = Emissions, group = Country) +
144     geom_path(aes(color = treated)) +
145     ylab(ylabel) +
146     scale_color_manual(values = c("red", "chartreuse4")) +
147     theme_bw() +
148     theme(axis.title.x=element_blank()) +
149     geom_vline(xintercept = 2008, color="black") +
150     labs(color = "Dans le SEQE ?") +
151     theme(
152       axis.title = element_text(size = 18),
153       axis.text = element_text(size = 13),
154       legend.title = element_text(size = 13),
155       legend.text = element_text(size = 12),

```

```

156     )
157
158
159     ggsave(name, plot=last_plot(), width=11, height = 5)
160     print(g2)
161 }
162 #plotOneGraphs(dataN02, "Global_emissions_N02.png")
163
164 #ecart est une fonction calculant l'effet du traitement en fonction de l
    'annee
165 #Technique prise de ce site : https://thetarzan.wordpress.com/2011/06/20/differences-in-differences-estimation-in-r-and-stata/
166 ecart = fonction(data,annee){
167     data$time = ifelse(data$Year >= annee, 1, 0)
168     data$treated = ifelse(data$Country == "Sweden" |
169                             data$Country == "Poland" |
170                             data$Country == "Luxembourg" |
171                             data$Country == "Bulgaria" |
172                             data$Country == "Denmark" |
173                             data$Country == "Romania", 1,0)
174     a = sapply(subset(data, time == 0 & treated == 0, select=Emissions),
175                mean)
176     b = sapply(subset(data, time == 0 & treated == 1, select=Emissions),
177                mean)
178     c = sapply(subset(data, time == 1 & treated == 0, select=Emissions),
179                mean)
180     d = sapply(subset(data, time == 1 & treated == 1, select=Emissions),
181                mean)
182     (d-c)-(b-a)
183 }
184
185 #piechart est une fonction qui renvoie un graphique "en camembert", avec
186     name le nom du fichier contenant le graphe
187 #utilisation : differentes variables calculees, proportion : proportion
188     de utilisation, mycols : couleur du graphe
189 #Le code s'est largement inspire de ce site : https://www.datanovia.com/en/fr/blog/comment-creer-un-camembert-dans-r-en-utilisant-ggplot2/
190 piechart = fonction(name, utilisation , proportion, mycols){
191     #Creation d'un data.frame
192     count.data <- data.frame(
193         Origine = utilisation,
194         prop = proportion
195     )
196
197     #Pour la position des chiffres dans le graphe
198     count.data <- count.data %>%
199         arrange(desc(Origine)) %>%

```

```

194     mutate(lab.ypos = cumsum(prop) - 0.5*prop)
195 count.data
196
197 #Graphe avec ses options
198 g=ggplot(count.data, aes(x = "", y = prop, fill = Origine)) +
199     geom_bar(width = 1, stat = "identity") +
200     coord_polar("y", start = 0)+
201     geom_text(aes(y = lab.ypos, label = prop), color = "white")+
202     scale_fill_manual(values = mycols) +
203     theme_void()
204 print(g)
205 ggsave(name, plot=last_plot(), width=5, height = 3)
206 }
207
208 #Executions des fonctions pour la base de donnees des emissions de CO2
209 dataCarbon=clean(dataCarbon)
210 check(dataCarbon)
211 regression(dataCarbon, 2005)
212 plotSum(dataCarbon, "sum_carbon.png")
213 plotOneGraphs(dataCarbon, "Global_emissions_carbon.png")
214 print(c(ecart(dataCarbon,2005), ecart(dataCarbon,2008), ecart(dataCarbon
    ,2013)))
215 piechart("carbon_origine.png", c("Utilisation de combustibles fossiles",
    "Changements dans l'utilisation des sols", "Procedes industriels"),
    c(87, 9, 4), c("#EFC000FF", "#CD534CFF", "#0073C2FF"))
216
217 #Executions des fonctions pour la base de donnees des emissions de N2O
218 dataCarbon=clean(dataN2O)
219 check(dataN2O)
220 regression(dataN2O, 2008)
221 plotSum(dataN2O, "sum_N2O.png")
222 plotOneGraphs(dataN2O, "Global_emissions_N2O.png")
223 print(c(ecart(dataN2O,2008), ecart(dataN2O,2013)))
224 piechart("N2O_origine.png", c("Agriculture", "Combustibles fossiles et
    procedes industriels", "Br lage de biomasse", "Dep ts
    atmospheriques", "Eaux usees humaines"), c(67,10,10,9,3), c("#0073
    C2FF", "#EFC000FF", "#CD534CFF", "#868686FF", "#60BD68"))

```

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