



Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade maîtrise en sciences de gestion

IMPACT DES POLITIQUES DE TARIFICATION DE CARBONE SUR LES GES AU CANADA

Présenté par
AWATIF MAHDI

Sciences de la gestion
(Spécialisation économie appliquée)

Directeur de recherche
JUSTIN CARON

December , 2024

Remerciement

Je dédie ce mémoire à toutes les femmes qui ont profondément marqué ma vie ainsi qu'à celles qui ont laissé une empreinte indélébile sur le monde. C'est un hommage sincère rendu à leur remarquable force de caractère, à leur inébranlable résilience et à leurs réalisations remarquables. Je souhaite également adresser mes pensées à l'université ainsi qu'à tous les enseignants qui m'ont accompagné durant la période difficile de la pandémie que nous avons traversée. Un remerciement particulier est adressé à Justin Caron.

Table des matières

1	Revue de littérature	12
1.1	Mécanismes de tarification du carbone	12
1.1.1	Le système de plafonnement et d'échange de droits d'émission: une approche flexible	12
1.2	Une approche par la taxe	16
1.2.1	La Colombie-Britannique: un exemple canadien réussi	17
1.2.2	Les pays scandinaves et l'Europe	18
1.2.3	Autres régions et études comparatives	18
1.2.4	Appréciation de la taxe carbone	18
2	Émission de GES au Canada et politique de régulation	20
2.1	Émissions de GES au Canada: état des lieux	20
2.1.1	Une analyse comparative des émissions de GES à l'échelle mondiale .	20
2.1.2	Analyse des émissions provinciales à l'aide du modèle <i>k</i> -means	23
2.2	Analyse de l'impact des activités économiques sur les émissions de CO ₂ . . .	27
2.2.1	Analyses statistiques descriptives	27
2.2.2	Synthèse des résultats et tendances principales	29
2.3	Règlementation sur les émissions de carbone au Canada	46
2.3.1	Système de plafonnement et d'échange (WCI)	46
2.3.2	Le choix d'une taxe carbone	48
2.3.3	Système basé sur les prélèvements sur les émissions et le rendement .	51
3	Méthodologie, Analyse et interprétation des résultats	53

3.1	Méthodologie	53
3.1.1	Spécification du modèle	53
3.1.2	Constitution des groupes	57
3.1.3	Tests de spécification du modèle	57
3.2	Résultats et discussions	60
3.2.1	Stationnarité	60
3.2.2	Multicolinéarité	61
3.2.3	Hétéroscédasticité et autocorrélation	62
3.2.4	Tendance parallèle	62
3.3	Résultat des tests d'estimation	64
3.3.1	Estimations principales	64
3.3.2	Analyse régionale	65
3.3.3	Discussion et implications	69

Table des figures

2.1	Répartition des émissions par province en 2017	24
2.2	Évolution des émissions du CO2 par tête entre 1997-2017	27
2.3	Score de critère de Calinski-Harabasz pour les différentes nombre des groupes obtenues	32
2.4	Evolution annuelle moyenne d'émission de CO2 par habitant pour les trois groupes régionaux obtenues par la méthode k -means (1997-2019).	33
2.5	Scores de critère de Calinski-Harabasz pour les différentes nombre des groupes obtenus par la méthode k -means.	36
2.6	Evolution annuelle moyenne d'émission de CO2 par habitant pour les cinq groupes régionaux obtenues par la méthode k -means (1997-2019).	37
2.7	Scores de critère de Calinski-Harabasz pour les différentes nombre des groupes obtenus par la méthode k -means.	40
2.8	Evolution annuelle moyenne d'émission de CO2 par habitant pour les cinq groupes des sources obtenus par la méthode k -means (1997-2019)	41
2.9	Groupe de trajectoire A obtenue par k -means	41
2.10	Groupe de trajectoire B obtenue par k -means	42
2.11	Groupe de trajectoire C obtenue par k -means	43
2.12	Groupe de trajectoire D obtenue par k -means	44
3.1	Graphique d'analyse des tendances	63
3.2	graphique de tendance Alberta après 2008	79

Liste des tableaux

2.1	Émissions de gaz à effet de serre par habitant à l'échelle mondiale, Canada et des 10 plus grands pays et régions émetteurs, 2005 et 2020.	23
2.2	Émission de CO ₂ par habitant pour les trois groupes (1997-2019)	32
2.3	Résultats de l'émission de CO ₂ pour les cinq groupes des sources (1997-2019)	38
3.1	résultats du test de stationnarité	58
3.2	Test de variable instrumentale	59
3.3	Résultat test d'hétéroscédasticité	59
3.4	Table test d'autocorrelation	60
3.5	Résultat régression Alberta Colombie Britannique	66
3.6	Résultat estimation Quebec et Manitoba	67
3.7	Évolution de la WCI	75
3.8	Émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale, Canada et des 10 plus grands pays et régions émetteurs, 2005 et 2020.	76
3.9	Statistiques descriptives de l'émission de CO ₂ par région et par secteur . . .	77
3.10	Statistiques descriptives de l'émission de CO ₂ par région et par secteur (suite)	78

Liste des abréviations

Abréviations	
ADF	Dicker Fuller Augmenté
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CO2	Dioxyde de carbone
DF	Dicker Fuller
DID	Double Difference
EU-ETS	Système d'Échange des Quotas de l'Union Européenne
GSE	Gaz à Effet de Serre
IPS	Im Pesaran et Shin
LLC	Levin Lin Chu
MCFED	MOSFET Controlled Field Emission Display
MDDEFP	Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs
MEGC	Modèle Équilibre Général Calculable
MELCCC	Ministère de l'Environnement et la Lutte Contre les Changements Climatique
NPD	Nouveau Parti Démocratique
PCF	Parti Communiste Français
PCU	Parti Conservateur Uni
PIB	Produit Intérieur Brut
POP	Population
RD	Recherche et Développement
SQUE	Système d'Échange de Quota d'Émission
SEQE-UE	Système d'Échange de Quota d'Émission de l'Union Européenne
SPEDE	Système de Plafonnement et d'Échange de Droits d'émission
VIF	Variance Inflation Factor
WCI	Western Climate Initiative

Résumé

Ce mémoire examine l'efficacité des politiques de tarification du carbone au Canada dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). L'étude analyse l'impact de la taxe carbone et du marché de plafonnement et d'échange (SPEDE) sur une période de 20 ans dans 11 provinces canadiennes. Les résultats révèlent des disparités significatives entre les régions: des provinces comme le Québec et l'Alberta ont enregistré des progrès mesurables, bien que limités, tandis que dans d'autres régions, l'impact est resté marginal, principalement en raison de niveaux de taxation constants et modérés. Ces observations mettent en lumière les limites d'une dépendance exclusive à la tarification du carbone. Elles soulignent la nécessité de mesures complémentaires, telles que des politiques sectorielles ciblées et l'adoption de technologies propres, pour renforcer l'efficacité des stratégies de réduction des émissions. Le mémoire propose également une analyse des implications économiques et sociales de ces politiques, tout en explorant leur potentiel à concilier les objectifs environnementaux avec les impératifs de compétitivité et d'équité. En combinant des approches méthodologiques avancées, notamment l'analyse de double différence (DID) et l'algorithme k -means, cette étude offre une évaluation critique et empirique des politiques de tarification en place. Les conclusions visent à fournir des recommandations concrètes aux décideurs pour optimiser les instruments actuels et contribuer à une transition écologique plus efficace au Canada.

Introduction

Depuis des décennies, les scientifiques du monde entier alertent sur les dangers croissants liés aux changements climatiques causés par les activités humaines. Ces activités, principalement industrielles et énergétiques, génèrent une quantité considérable de dioxyde de carbone (CO_2) et d'autres gaz à effet de serre (GES), tels que le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O). Ces émissions sont à l'origine d'un réchauffement climatique devenu une menace universelle, nécessitant des actions urgentes et coordonnées (Agarwal & Rottingen, 2023). Le consensus scientifique est clair: l'augmentation de la température mondiale engendre des conséquences graves, non seulement sur les écosystèmes naturels, mais aussi sur les activités humaines, la biodiversité et la santé publique. Bien que le défi climatique soit global, les réponses politiques et leurs impacts diffèrent selon les capacités économiques, les priorités stratégiques et les engagements des pays.

Le Canada, bien qu'il ne représente qu'environ 1.5% des émissions mondiales, se distingue par un des taux les plus élevés d'émissions par habitant. En 2022, ces émissions étaient estimées à 708 mégatonnes d'équivalent dioxyde de carbone (Mt d'éq. CO_2) (Gouvernement du Canada, 2024). Cette situation s'explique par plusieurs facteurs spécifiques: un climat froid nécessitant des besoins énergétiques importants, une économie fortement dépendante des ressources naturelles et une prévalence du transport motorisé. Par ailleurs, le Canada joue un rôle crucial dans la lutte contre les changements climatiques, s'étant engagé dans l'Accord de Paris à limiter le réchauffement global à 1.5°C par rapport aux niveaux préindustriels. Ces caractéristiques font du Canada un cadre d'étude particulièrement pertinent pour examiner l'efficacité des politiques climatiques, notamment dans le contexte de disparités régionales marquées.

L'un des outils économiques les plus discutés pour atteindre ces objectifs est la tarifica-

tion du carbone, qui repose sur le principe du pollueur-payeur. Ce mécanisme attribue un coût explicite aux émissions de GES, incitant ainsi entreprises et particuliers à adopter des pratiques et des technologies plus durables (Gollier, 2019). Deux approches principales sont utilisées: la taxe carbone et le système de plafonnement et d'échange (SPEDE, ou marché du carbone). Ces mécanismes visent à internaliser les coûts environnementaux associés aux émissions, tout en orientant les décisions économiques vers une transition écologique. En théorie, ces instruments offrent une solution efficace et flexible pour réduire les émissions, mais leur mise en œuvre et leur efficacité varient selon les contextes régionaux et sectoriels.

Plusieurs provinces canadiennes ont adopté des politiques pionnières en matière de tarification du carbone, souvent avant l'intervention du gouvernement fédéral. Par exemple, la Colombie-Britannique a instauré une taxe carbone en 2008, qui est devenue un modèle international (ICI.Radio-Canada.ca, 2024). En 2013, le Québec a mis en place un marché de plafonnement et d'échange en collaboration avec l'État de Californie, constituant ainsi le premier système transfrontalier de ce type en Amérique du Nord (Blais, 2024). L'Alberta, riche en ressources pétrolières, a adopté dès 2007 un système de tarification fondé sur le rendement (Gouvernement du Canada, 2021). Ces exemples illustrent la diversité des approches provinciales, reflétant les priorités économiques et environnementales variées des régions canadiennes.

Il est important de noter que les systèmes de tarification du carbone, bien qu'efficaces dans certains contextes, ne sont pas exempts de critiques. Plusieurs économistes soulignent que ces politiques peuvent réduire la compétitivité des entreprises nationales, notamment dans les secteurs fortement consommateurs d'énergie (Rammer et al., 2017). Cette diminution de compétitivité peut conduire à des fuites de carbone, un phénomène où les activités économiques et les émissions associées se déplacent vers des juridictions dotées de réglementations environnementales moins strictes. Par ailleurs, les coûts additionnels générés par ces politiques, tels que les taxes ou les frais liés aux quotas d'émission, peuvent être répercutés sur les consommateurs finaux, ce qui augmente le coût de la vie et exacerbe les inégalités sociales. Ces préoccupations d'équité et d'impact économique expliquent pourquoi certains pays hésitent à adopter des mécanismes de tarification du carbone ou choisissent de limiter leur portée. Ces critiques soulignent la nécessité de concevoir des politiques climatiques

équilibrées, combinant efficacité environnementale, viabilité économique et justice sociale.

Les résultats des études sur l'impact de ces politiques varient considérablement selon les régions, les secteurs économiques et les méthodes d'analyse. Par exemple, en Colombie-Britannique, bien que la taxe carbone ait été saluée pour sa capacité à réduire la consommation de combustibles fossiles (Murray & Rivers, 2015), certaines recherches soulignent un manque de preuves empiriques quant à son effet global sur les émissions (Escamilla-García et al., 2024). Au Québec, les objectifs de réduction des émissions de 20% par rapport aux niveaux de 1990 ont été atteints en 2020 (Ministère de l'Environnement, 2021), bien qu'il soit difficile d'attribuer ces résultats exclusivement au marché du carbone. À l'échelle nationale, l'adoption en 2018 de la Loi sur la tarification de la pollution causée par les GES, également appelée « filet de sécurité fédéral », visait à garantir qu'aucune province ne soit exempte d'un mécanisme de tarification (Gouvernement du Canada, 2018). Toutefois, cette politique a suscité des controverses en raison de son impact économique sur les ménages et les entreprises, et de sa perception publique.

Malgré des initiatives pionnières comme celles du Québec et de la Colombie-Britannique, les résultats des politiques de tarification du carbone au Canada varient considérablement selon les régions et secteurs économiques. Cette disparité soulève une question centrale: dans quelle mesure les politiques de tarification du carbone au Canada ont-elles permis de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES)? Cette problématique constitue le cœur de ce mémoire, qui vise à évaluer l'impact réel de ces politiques dans un contexte marqué par des disparités régionales et sectorielles. Pour répondre à cette question, une analyse empirique couvrant 11 provinces canadiennes sur une période de 20 ans a été menée. Une méthodologie combinant deux approches analytiques complémentaires a été adoptée. La première, la méthode de double différence (DID), permet de quantifier l'impact causal des politiques en comparant les variations des émissions avant et après leur mise en œuvre. La seconde, l'algorithme de classification k -means, regroupe les provinces et secteurs en fonction de profils homogènes d'émissions. Cette double approche permet d'identifier les dynamiques spécifiques, les trajectoires d'émissions et les contextes socio-économiques dans lesquels ces politiques se révèlent les plus efficaces.

Les résultats de cette recherche ambitionnent de contribuer aux débats sur les politiques

climatiques en fournissant des recommandations pratiques pour optimiser l'efficacité des instruments économiques tout en tenant compte des spécificités socio-économiques et environnementales du Canada.

Chapitre 1

Revue de littérature

1.1 Mécanismes de tarification du carbone

La tarification du carbone représente une des stratégies les plus efficaces pour combattre le changement climatique. En attribuant un coût explicite aux émissions de gaz à effet de serre (GES), cette politique cherche à internaliser les externalités environnementales, c'est-à-dire les coûts indirects liés à la pollution, qui ne sont souvent pas pris en compte dans les transactions économiques traditionnelles (Gillingham & Stock, 2018). Deux mécanismes principaux permettent de mettre en œuvre cette tarification: la taxe carbone et le système de plafonnement et d'échange de droits d'émission (SPEDE), également connu sous le nom de marché du carbone. Ces mécanismes, bien que différents dans leur application, partagent un objectif commun: réduire les émissions de GES de manière efficace tout en favorisant une transition économique durable.

1.1.1 Le système de plafonnement et d'échange de droits d'émission: une approche flexible

Le système de plafonnement et d'échange (SPEDE) impose une limite maximale sur les émissions totales autorisées pour un groupe d'émetteurs, tels que les industries lourdes ou les producteurs d'énergie (Laviolette, 2024). Ce plafond est réparti en permis d'émission, attribués gratuitement ou vendus aux enchères, permettant aux entreprises de choisir les

solutions les plus rentables pour respecter leurs quotas. Les entreprises qui dépassent leurs permis doivent acheter des crédits supplémentaires sur le marché, tandis que celles qui émettent moins que leur allocation peut vendre leurs excédents. Ce mécanisme favorise une allocation efficace des ressources grâce à la détermination des prix par la loi de l'offre et de la demande.

Le SPEDE se distingue par sa flexibilité, offrant aux entreprises l'option d'investir dans des technologies propres ou de participer au marché des permis, selon leurs coûts marginaux. À mesure que le plafond est abaissé, le prix des crédits augmente, renforçant l'incitation à réduire les émissions. Toutefois, une mauvaise conception, comme une allocation excessive de permis, peut diminuer ces incitations en maintenant des prix bas. De plus, le risque de « fuite de carbone », où les entreprises déplacent leurs activités vers des régions sans régulation, demeure une limitation importante (Verret-Hamelin, 2019). Ces défis soulignent la nécessité d'une régulation rigoureuse et d'une coordination internationale pour maximiser l'efficacité du système.

Les fondements théoriques des marchés de carbone

Les travaux fondateurs de Weitzman (1974) distinguent les politiques environnementales basées sur les prix, comme les taxes carbone, et celles basées sur les quantités, comme les quotas. Dans des contextes où les dommages marginaux des émissions augmentent rapidement, les quotas sont préférés pour garantir le respect des limites d'émissions. En revanche, dans des scénarios d'incertitude sur les coûts de réduction, les taxes sont plus efficaces car elles offrent une prévisibilité économique.

Ce cadre théorique a été enrichi par Hahn et Stavins (2010) en explorant la « propriété d'indépendance » des systèmes de plafonnement et d'échange. Ils démontrent que l'efficacité économique de ces systèmes reste indépendante de la répartition initiale des permis, à condition que les échanges soient libres et compétitifs. Ces travaux, confirmés dans le contexte du Système communautaire d'échange de quotas d'émission (SCEQE) de l'Union européenne, mettent en évidence l'importance d'une conception rigoureuse pour garantir l'efficacité des marchés de carbone.

Les bénéfices économiques et écologiques des SPEDE

L'«hypothèse de Porter», introduite dans les années 1990, propose que des réglementations environnementales bien conçues peuvent stimuler l'innovation et renforcer la compétitivité des entreprises (Lanoie et al., 2008). Cette hypothèse trouve un écho dans les résultats du SCEQE, où des gains en chiffre d'affaires et en valeur ajoutée ont été observés, notamment lors des phases 2 et 3 (Dechezleprêtre et al., 2023). Cependant, les premières phases ont montré des impacts négatifs sur l'emploi, attribués à une réallocation de la main-d'œuvre vers des secteurs moins polluants.

Ces résultats suggèrent que, bien conçu, un SPEDE peut atteindre un double objectif: réduire les émissions et promouvoir une transformation économique vers des technologies durables, tout en minimisant les perturbations sociales.

Études de cas: le SCEQE et la Chine

Le Système communautaire d'échange de quotas d'émission (SCEQE), lancé en 2005, est le plus vaste marché du carbone au monde. Des analyses empiriques montrent qu'il a contribué à des réductions significatives des émissions dans les secteurs industriels, tout en favorisant des investissements dans des technologies plus propres (Bordignon & Gamannossi degl'Innocenti, 2023). Dans le secteur aérien, l'étude de Fageda & Teixido-Figueras (2023) a révélé que les compagnies à bas coûts ont amélioré leur efficacité opérationnelle, en réponse à la hausse des coûts liée au marché, ce qui a stimulé la modernisation des flottes aériennes.

En Chine, le marché du carbone, introduit en 2017, a également réduit les émissions dans les régions pilotes tout en encourageant l'innovation dans les énergies renouvelables. Selon Leng & Zhang (2023), ce système a incité à des investissements accrus dans des sources d'énergie propre, notamment l'éolien, tout en réduisant la dépendance aux combustibles fossiles comme le charbon. Cependant, ils soulignent également que des transferts d'émissions vers des régions non régulées ont limité l'efficacité globale du programme. Ces résultats illustrent l'importance d'une couverture nationale uniforme et d'une intégration stratégique des politiques climatiques pour maximiser les bénéfices environnementaux tout en minimisant les impacts sociaux.

Ces études de cas mettent en évidence que la conception et l'application des marchés

du carbone jouent un rôle déterminant dans leur succès. Des mesures complémentaires, telles que la coordination internationale et le renforcement des réglementations dans les zones non couvertes, restent essentielles pour garantir des résultats optimaux.

Expériences nord-américaines: le cas du SPEDE au Québec Le système de plafonnement et d'échange (SPEDE) du Québec est souvent présenté comme un modèle nord-américain pour sa capacité à concilier objectifs environnementaux et économiques. Lachapelle et Macdonald (2020) indiquent que ce mécanisme a contribué à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES), bien que son impact spécifique reste difficile à isoler en raison d'autres politiques provinciales. À l'échelle internationale, le SPEDE québécois a également été mis en avant par le premier ministre François Legault lors de sa visite en France en 2019, soulignant son rôle dans la lutte contre le changement climatique (TV5Monde, 2019). Cette reconnaissance internationale reflète l'innovation de ce modèle.

À l'échelle fédérale, la Loi canadienne sur la tarification des GES a également permis des réductions progressives, bien que les résultats varient selon les provinces et secteurs en fonction des spécificités locales (Gouvernement du Canada, 2022). Contrairement à une taxe carbone, qui fixe un prix par tonne de CO₂ émise, le SPEDE impose un plafond strict sur les émissions totales, garantissant une réduction mesurable et prévisible des GES. Pineau (2020) souligne que cette certitude environnementale est essentielle pour atteindre les objectifs climatiques à long terme.

Cependant, les marchés du carbone, y compris le SPEDE québécois, présentent des limitations. Une critique majeure porte sur la volatilité des prix des permis, qui complique la planification des investissements à long terme (Martin et al., 2019). Pour répondre à ce défi, le Québec a mis en place des allocations gratuites de permis pour les industries exposées à la concurrence internationale, limitant ainsi les impacts économiques négatifs sans compromettre l'efficacité environnementale, puisque le plafond global des émissions reste inchangé (Ministère de l'Environnement, 2020).

L'efficacité des marchés du carbone dépend également de leur intégration dans des cadres stratégiques cohérents. Par exemple, des recherches menées au Mexique (Barragán-Beaud et al., 2018) montrent que des marchés bien intégrés peuvent stimuler l'innovation technologique

et favoriser les investissements dans des industries à faible intensité carbone. Toutefois, ces bénéfices doivent être équilibrés par des politiques visant à limiter les effets sociaux négatifs, tels que la transition vers des emplois *verts* au détriment des secteurs traditionnels, comme le rappellent Hsu et al. (2021). Ces observations mettent en lumière la nécessité d'étudier plus en profondeur l'impact spécifique du SPEDE québécois sur les émissions de GES, en tenant compte des spécificités locales et sectorielles.

1.2 Une approche par la taxe

La taxe carbone consiste à fixer un prix par tonne de dioxyde de carbone émise, appliqué principalement aux combustibles fossiles utilisés dans les secteurs du chauffage, du transport et de la production d'électricité. Selon la théorie économique, un signal prix explicite incite les entreprises et les consommateurs à réduire leur consommation de combustibles polluants ou à adopter des technologies plus propres (Maaloul, 2020). Ce mécanisme repose sur deux approches principales pour déterminer le niveau de la taxe: le coût social du carbone, qui reflète les dommages environnementaux et économiques causés par une tonne de CO₂ émise, ou une approche ciblant un objectif de réduction spécifique, basé sur des simulations économiques intégrant les comportements prévus des agents économiques.

L'un des principaux atouts de la taxe carbone est sa capacité à fournir un signal prix stable et prévisible. Cette stabilité permet aux entreprises d'intégrer les coûts environnementaux dans leurs stratégies à long terme et d'investir dans des technologies à faible émission de carbone. De plus, les recettes fiscales peuvent être redistribuées ou réinvesties pour soutenir la transition écologique. Par exemple, des crédits d'impôt ou des subventions pour l'isolation thermique contribuent à réduire la facture énergétique des ménages tout en accélérant l'adoption de technologies durables (Zhang & Wang, 2017).

Cependant, la taxe carbone présente des défis. Les disparités économiques et sociales entre régions compliquent son application universelle. De plus, elle peut augmenter les coûts pour les consommateurs et réduire la compétitivité des entreprises nationales dans les secteurs fortement émetteurs. Ces inconvénients soulignent l'importance d'un design politique adapté, intégrant des mécanismes compensatoires pour atténuer les impacts négatifs

sur les ménages et les entreprises, tout en garantissant une efficacité environnementale.

L'efficacité de la taxe repose également sur sa progressivité. Une taxe qui augmente graduellement au fil du temps offre un signal prix clair et incite les agents économiques à intégrer ces coûts dans leurs décisions d'investissement. Romer (2017) et Klenert et al. (2018) soulignent qu'une progression adaptée aligne les politiques nationales sur les objectifs climatiques internationaux, en favorisant une transition durable et anticipée.

L'exemple de la Suède illustre les bénéfices d'une taxe carbone bien conçue. Introduite en 1991 avec un taux initial modéré, cette taxe a progressivement augmenté pour atteindre 120 € par tonne en 2022, devenant ainsi la plus élevée au monde (Dervaux, 2023). Cette politique a permis de réduire considérablement les émissions de GES tout en maintenant une croissance économique stable, démontrant qu'une taxe carbone peut concilier développement économique et durabilité environnementale.

1.2.1 La Colombie-Britannique: un exemple canadien réussi

La Colombie-Britannique a introduit une taxe carbone en 2008, avec un taux initial de 10\$ CAN par tonne de CO₂, progressivement porté à 80\$ CAN en 2024 (Blake et al., 2024). Cette taxe est souvent citée comme un modèle d'efficacité en Amérique du Nord pour sa capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) tout en maintenant la compétitivité économique (Elgie & McClay, 2013).

Les études empiriques confirment son impact. Rivers & Schaufele (2015) ont démontré qu'une augmentation de 5 cents par litre due à la taxe carbone entraîne une réduction de 12.5% de la demande de carburant, contre seulement 1.8% pour une hausse équivalente des prix de marché. Cette efficacité s'explique par le signal prix explicite envoyé aux consommateurs, qui incite à des changements durables, contrairement aux fluctuations temporaires des prix de marché.

Bien que la redistribution des recettes ait renforcé son acceptabilité sociale, elle n'affecte pas directement son efficacité environnementale (Perron-Langlais, 2019). En conclusion, la taxe carbone de la Colombie-Britannique démontre l'efficacité d'une tarification claire et progressive pour atteindre des objectifs climatiques ambitieux.

1.2.2 Les pays scandinaves et l'Europe

Dans les pays européens, notamment en Finlande, au Danemark et aux Pays-Bas, la taxe carbone a également produit des résultats positifs. Lin & Li (2011) ont utilisé la méthode des doubles différences pour évaluer son impact sur les émissions de CO₂ dans cinq pays européens (Lin & Li, 2011). Bien que les effets varient, la Finlande a enregistré une réduction significative des émissions par habitant (-1.69%), tandis que les résultats pour le Danemark et les Pays-Bas étaient moins prononcés. Andersson (2019) a montré que la fiscalité environnementale en Suède avait entraîné des réductions importantes des émissions dans les secteurs des transports et du résidentiel, grâce à des politiques de soutien complémentaires telles que les subventions pour les véhicules électriques et les rénovations énergétiques (Andersson, 2019).

1.2.3 Autres régions et études comparatives

Au-delà de l'Europe et de l'Amérique du Nord, des recherches menées dans des pays émergents ont également mis en lumière le potentiel de la taxe carbone. Par exemple, Barragán-Beaud et al. (2018) ont étudié l'efficacité de la taxe carbone au Mexique à l'aide du modèle d'optimisation Balmorel-MX (Barragán-Beaud et al., 2018). Leurs résultats ont montré que cette approche permettait de réduire les émissions de manière significative tout en minimisant les impacts économiques négatifs. De même, Mpoto (2020) a démontré que la taxe carbone au Canada était plus efficace qu'une taxe uniforme sur l'énergie, en particulier lorsqu'elle était accompagnée d'une restructuration fiscale (Mpoto, 2020).

1.2.4 Appréciation de la taxe carbone

Les études montrent que l'impact de la taxe carbone varie considérablement selon les secteurs. Dans le secteur manufacturier britannique, Martin & Saikawa (2017) ont observé que la taxe carbone avait entraîné une réduction significative de l'intensité énergétique et de la consommation d'électricité, tout en maintenant la compétitivité globale des entreprises. En Suède, les politiques fiscales environnementales ont permis des réductions notables dans les secteurs des transports et du résidentiel, selon Andersson (2019).

Dans le secteur de l'énergie, Nakata et Lamont (2001) ont montré que la taxe carbone pouvait réorienter l'allocation des ressources, en favorisant le gaz naturel au détriment du charbon, ce qui contribue à réduire les émissions de CO₂ (Nakata & Lamont, 2001). Xiang et Lawley (2018) ont analysé l'impact de la taxe carbone sur la consommation résidentielle de gaz naturel au Canada, constatant une réduction par habitant de 7% à 10.1% entre 1990 et 2014 (Xiang & Lawley, 2019). Ces résultats soulignent le rôle de la taxe carbone dans la transformation du secteur énergétique.

L'un des défis majeurs de la taxe carbone est son acceptabilité sociale, souvent liée à ses impacts sur les ménages à faible revenu. Pour répondre à cette préoccupation, de nombreux gouvernements ont adopté des mécanismes de redistribution des recettes. En Colombie-Britannique, les recettes générées par la taxe sont redistribuées sous forme de crédits d'impôt et de réductions fiscales, garantissant une équité économique tout en maintenant le soutien public.

Chapitre 2

Émission de GES au Canada et politique de régulation

2.1 Émissions de GES au Canada: état des lieux

Depuis 1990, une croissance continue des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) a attiré l'attention des scientifiques et des décideurs politiques, soulignant l'urgence de mettre en œuvre des mesures pour freiner cette tendance alarmante. Si le Canada ne figure pas parmi les plus gros émetteurs en termes absolus comparé à d'autres grandes nations développées, sa situation demeure critique lorsque l'on considère les émissions par habitant et leur impact proportionnel. Ces données permettent de mieux comprendre l'ampleur des défis auxquels le pays est confronté dans sa transition vers une économie durable et respectueuse de l'environnement.

2.1.1 Une analyse comparative des émissions de GES à l'échelle mondiale

Composition des émissions de GES au Canada: Les émissions de gaz à effet de serre (GES) au Canada se composent principalement de dioxyde de carbone (CO_2), de méthane (CH_4), de protoxyde d'azote (N_2O) et de gaz fluorés. Selon le Rapport d'inventaire national 1990-2019 : Sources et puits de gaz à effet de serre (Édition 2021), le (CO_2) représente 80%

des émissions totales en 2020, suivi du (CH_4) (13%), émis principalement par l'agriculture et la gestion des déchets, et du (N_2O) (5%), dont le potentiel de réchauffement global est 298 fois supérieur à celui du CO_2 . Les émissions de N_2O proviennent principalement de l'utilisation d'engrais azotés et d'activités industrielles. Bien que représentant une faible part (1.8%), les gaz fluorés ont des potentiels de réchauffement extrêmement élevés.

Cette répartition illustre la prédominance du CO_2 dans les émissions nationales, tout en mettant en évidence l'impact disproportionné des autres gaz à effet de serre, notamment le N_2O , qui nécessite des mesures spécifiques dans les politiques climatiques, en particulier dans le secteur agricole.

Composition des émissions de GES au Canada Les émissions de gaz à effet de serre sont composées de plusieurs substances, dont le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), l'oxyde nitreux (N_2O) et des gaz fluorés comme les hydrofluorocarbures (HFC) et le trifluorure d'azote (NF_3). Au Canada, le CO_2 domine cette composition, représentant 582 mégatonnes, soit 80% des émissions totales en 2020. Le méthane, principalement émis par les activités agricoles et la gestion des déchets, constitue 13% des émissions, suivi de l'oxyde nitreux (5%) et des gaz fluorés (1.8%).

Les principales sources d'émissions de GES au Canada incluent:

- Le secteur de l'énergie, qui englobe la production d'électricité, l'exploitation pétrolière et gazière, et les transports, représentant une majorité des émissions;
- L'agriculture, contribuant principalement au méthane et à l'oxyde nitreux;
- L'industrie manufacturière et la construction, responsables d'émissions directes liées aux processus industriels;
- La gestion des déchets, qui émet du méthane à partir des décharges et des eaux usées.

La répartition des émissions varie considérablement entre les provinces canadiennes, ce qui fait état de différences dans les structures économiques, les sources énergétiques et les politiques environnementales locales. Par exemple, les provinces productrices de pétrole comme l'Alberta et la Saskatchewan affichent des taux d'émissions nettement plus élevés que les provinces axées sur les énergies renouvelables, comme le Québec.

Tendances historiques et engagements climatiques du Canada Depuis 1990, les émissions de GES au Canada ont augmenté de manière relativement mesurée, avec une hausse globale de 5.64% entre 1997 et 2019. Cependant, cette progression n'a pas été uniforme, des augmentations significatives ayant été observées en 2004 (+7.9%) et en 2007 (+8.67%). Ces hausses reflètent l'intensification des activités dans des secteurs comme l'extraction des sables bitumineux et les transports. Ces tendances vont à l'encontre des engagements pris par le Canada dans le cadre du Protocole de Kyoto, qui visait à réduire les émissions de 5% par rapport aux niveaux de 1990 entre 2008 et 2012 (Dufour, 2020).

Malgré ces échecs initiaux, le Canada s'est engagé dans de nouveaux accords internationaux, notamment l'Accord de Paris, avec des objectifs plus ambitieux. Toutefois, atteindre ces cibles nécessite des efforts considérables pour transformer les secteurs à forte intensité carbone et adopter des technologies propres à grande échelle.

Comparaison internationale des émissions par habitant Les émissions par habitant offrent une perspective différente sur les responsabilités climatiques des nations. Avec 17.8 tonnes par personne en 2020, le Canada se classe au deuxième rang mondial, juste derrière l'Arabie saoudite. Ce chiffre contraste avec la moyenne mondiale de 5.9 tonnes par habitant. Cette intensité élevée des émissions reflète des facteurs structurels, notamment le climat froid, la prévalence des véhicules personnels et la dépendance aux combustibles fossiles pour le chauffage et la production d'énergie.

En comparaison, des pays comme la Chine, bien que premier émetteur mondial en termes absolus, affichent des émissions par habitant de 9.2 tonnes, en raison de leur vaste population. Les efforts du Canada pour réduire ses émissions doivent donc être évalués à la lumière de ces disparités, en tenant compte de son potentiel d'innovation technologique et de ses ressources naturelles abondantes.

Table 2.1 – Émissions de gaz à effet de serre par habitant à l'échelle mondiale, Canada et des 10 plus grands pays et régions émetteurs, 2005 et 2020.

Pays ou région	GES 2005	GES 2020	Variation
Arabie saoudite	17.9	20.5	14.7 %
Canada	21.5	17.8	-17.2 %
Etats-Unis	22.9	16.6	-27.5 %
Fédération de Russic.	15.6	16.2	3.5 %
Tran	9.4	10.1	7.5 %
Chine	5.6	9.2	64.6 %
Japon	10.1	8.7	-14.1 %
Union européenne	9.8	7.0	-28.7 %
Brésil	4.8	5.0	3.9 %
Indonésie	3.1	3.6	13.7 %
Inde	1.7	2.3	35.7 %
Monde	6.0	5.9	-0.8 %

Source: World Resources Institute (2023).

2.1.2 Analyse des émissions provinciales à l'aide du modèle k -means

L'algorithme de classification k -means a été utilisé pour regrouper les provinces canadiennes en clusters homogènes en fonction de leurs niveaux d'émissions de CO₂ et de leurs caractéristiques économiques. Cette méthode permet de révéler des dynamiques régionales spécifiques tout en tenant compte des disparités importantes entre les provinces.

L'utilisation de l'algorithme k -means est justifiée par deux objectifs principaux. D'une part, il permet de comprendre les disparités régionales en identifiant des regroupements non intuitifs, révélant des similitudes dans les dynamiques d'émissions entre provinces, indépendamment de leurs profils économiques distincts. D'autre part, ces regroupements fournissent une base analytique pour développer des politiques climatiques mieux adaptées aux réalités régionales et sectorielles, contribuant ainsi à contextualiser l'efficacité des politiques dans le cadre des objectifs de réduction des GES.

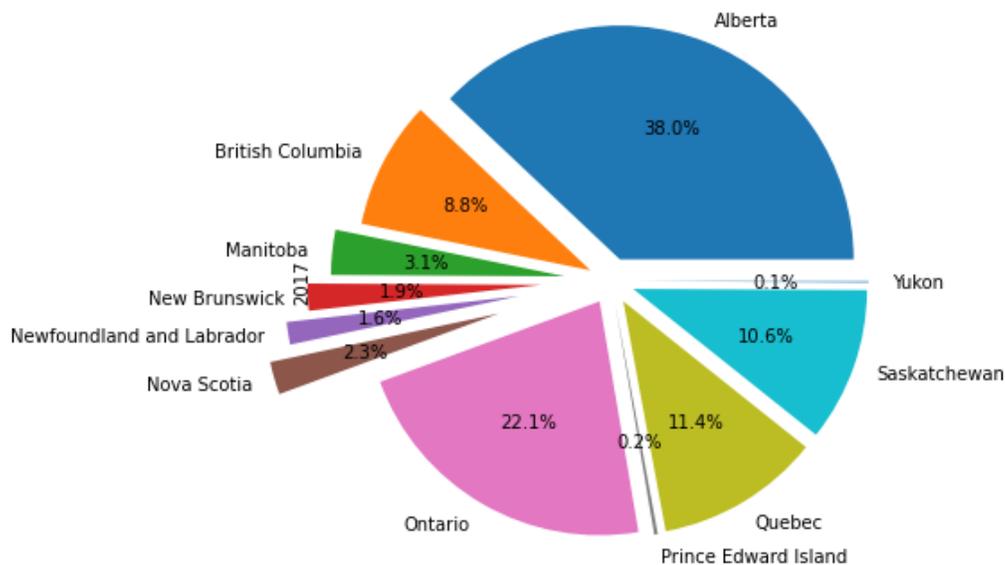


Figure 2.1 – Répartition des émissions par province en 2017

Les résultats présentés dans cette section apportent des informations stratégiques pour cibler les interventions et répondre aux objectifs de réduction des GES de manière différenciée.

Répartition des émissions par groupes

Premier groupe: les plus grands émetteurs Le premier groupe regroupe les provinces avec les niveaux d'émissions les plus élevés, représentant collectivement plus de 55% des émissions nationales. L'Alberta, avec une contribution de 37% des émissions nationales, domine largement ce groupe, suivie de l'Ontario avec 22%. Ces deux provinces, à elles seules, totalisent près de 60% des émissions du pays. L'importance des émissions de l'Alberta peut être attribuée à son industrie pétrolière et gazière, qui est une source majeure de CO₂. De son côté, l'Ontario, bien qu'émettrice, bénéficie de la transition vers une production énergétique plus propre grâce à l'élimination progressive de ses centrales au charbon.

Deuxième groupe: les émetteurs moyens Le deuxième groupe inclut des provinces telles que le Québec, la Saskatchewan et la Colombie-Britannique. Ces provinces contribuent respectivement à hauteur de 11%, 10% et 9% des émissions nationales. Malgré leur classe-

ment dans ce groupe intermédiaire, leurs profils diffèrent considérablement. Par exemple, la Colombie-Britannique a adopté une taxe carbone précoce et ambitieuse, ce qui a contribué à limiter ses émissions, tandis que la Saskatchewan reste fortement dépendante des énergies fossiles.

Troisième groupe: les faibles émetteurs Le dernier groupe se compose des provinces ayant les niveaux d'émissions les plus faibles. Le Yukon et l'Île-du-Prince-Édouard se distinguent par leurs émissions quasi négligeables, représentant chacune moins de 1% des émissions nationales. D'autres provinces, comme le Manitoba, le Nouveau-Brunswick, Terre-Neuve-et-Labrador et la Nouvelle-Écosse, affichent des contributions légèrement plus élevées, mais toujours inférieures à 5% du total national.

Révision des classifications selon les émissions par habitant Une analyse complémentaire, prenant en compte les émissions par habitant, a révélé des contradictions intéressantes par rapport à la classification initiale. Bien que l'Alberta soit le plus grand émetteur en termes absolus, elle conserve aussi le taux le plus élevé d'émissions par habitant, représentant 25% des émissions totales ajustées à la population. La Saskatchewan suit de près avec 24%. En revanche, l'Ontario, initialement classé parmi les plus grands contributeurs en termes absolus, se positionne désormais parmi les faibles émetteurs par habitant, grâce à sa population relativement importante et à ses efforts de réduction des émissions.

Cette réévaluation met également en lumière des changements notables pour certaines provinces. Par exemple, le Yukon, classé auparavant parmi les quasi non-pollueurs en termes absolus, affiche désormais un taux d'émissions par habitant supérieur à celui du Québec, de la Colombie-Britannique et même de certaines provinces intermédiaires. Cela illustre l'importance d'intégrer des indicateurs multiples pour une compréhension complète des dynamiques d'émissions.

Analyse des tendances historiques: évolution des émissions (1997–2017)- Fig.(2.2)

Les données montrent des variations importantes dans l'évolution des émissions de CO₂ parmi les provinces canadiennes entre 1997 et 2017. L'Alberta, principale contributrice, a connu une augmentation significative de ses émissions, principalement en raison de l'expansion de

l'exploitation des sables bitumineux et de la production énergétique à base de combustibles fossiles. De même, la Saskatchewan a vu ses émissions augmenter, reflétant sa dépendance continue aux centrales au charbon.

En revanche, certaines provinces, comme l'Ontario et le Québec, ont enregistré des réductions notables de leurs émissions. L'Ontario, en particulier, a bénéficié de la fermeture progressive de ses centrales au charbon et de l'adoption de politiques axées sur les énergies renouvelables. Le Québec, avec une production énergétique dominée par l'hydroélectricité, maintient l'un des niveaux d'émissions par habitant les plus faibles parmi les provinces.

Facteurs déterminants des émissions provinciales

Industrie énergétique Les émissions les plus élevées sont généralement observées dans les provinces riches en ressources naturelles, comme l'Alberta et la Saskatchewan. Ces régions dépendent fortement de l'exploitation des hydrocarbures, ce qui explique leurs contributions disproportionnées aux émissions nationales.

Population et densité Les provinces à forte densité de population, comme l'Ontario et le Québec, présentent des dynamiques contrastées. Si leurs émissions absolues sont élevées, leur classement par habitant tend à être plus favorable grâce à une population plus importante et à des politiques énergétiques plus avancées.

Politiques climatiques Les provinces ayant adopté des politiques climatiques ambitieuses, comme la Colombie-Britannique avec sa taxe carbone ou le Québec avec son marché du carbone (SPEDE), enregistrent généralement des performances meilleures en termes de réduction des émissions. Ces initiatives montrent l'impact positif des politiques économiques et environnementales intégrées.

L'utilisation du modèle *k*-means a permis d'identifier des tendances importantes et des groupes homogènes parmi les provinces canadiennes. Cependant, cette approche présente certaines limites. Par exemple, elle ne prend pas en compte les dynamiques temporelles ou les interactions entre les politiques provinciales. Une analyse plus approfondie, intégrant

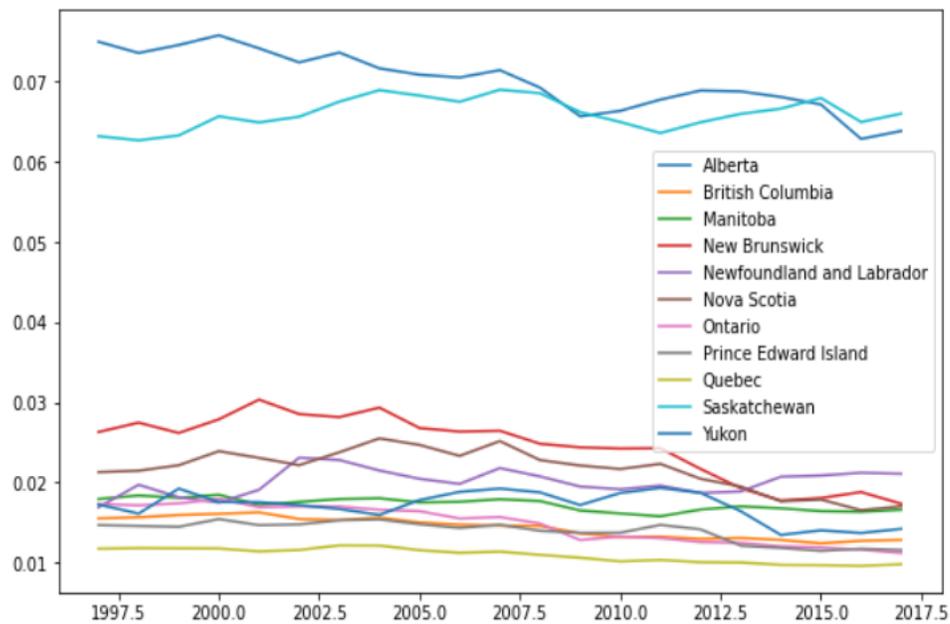


Figure 2.2 – Évolution des émissions du CO2 par tête entre 1997-2017

des méthodes comme la DID ou des approches de contrôle synthétique, pourrait offrir des perspectives plus détaillées sur l'efficacité des politiques climatiques à l'échelle provinciale.

De plus, bien que le modèle *k*-means permette une classification utile, il ne tient pas compte des différences qualitatives entre les provinces, telles que la structure économique ou les ressources disponibles pour la transition énergétique. Ces éléments mériteraient une attention particulière pour affiner les stratégies de réduction des émissions à l'échelle nationale.

2.2 Analyse de l'impact des activités économiques sur les émissions de CO₂

2.2.1 Analyses statistiques descriptives

Résumé des émissions par région et par secteur La suite analyse descriptives de données est d'après les Tableaux 3.9 et 3.10-Annexe B.

Alberta L'Alberta, en tant que province à forte activité industrielle et énergétique, enregistre les niveaux d'émissions les plus élevés parmi les provinces canadiennes. Le secteur du charbon, qui était historiquement un contributeur majeur, montre une réduction notable de ses émissions $-(17,17\%)$ sur la période analysée. Cependant, le secteur du pétrole et du gaz reste la principale source d'émissions, avec 141.2923 mégatonnes de CO_2 en 2019. Cette domination reflète la dépendance de la province aux sables bitumineux et aux industries extractives.

Colombie-Britannique En Colombie-Britannique, le secteur de l'électricité affiche les émissions les plus faibles (0.2503 mégatonnes), grâce à une production énergétique largement hydroélectrique. En revanche, le secteur des transports est le principal contributeur, avec 211993 mégatonnes de CO_2 . Une réduction marginale $-(1.99\%)$ est observée dans le secteur du pétrole et du gaz, reflétant les efforts de la province pour diversifier ses sources d'énergie.

Manitoba Au Manitoba, la production de charbon génère les émissions les plus basses (0.0122 mégatonnes), tandis que le transport est le secteur le plus émetteur, atteignant 7.9061 mégatonnes de CO_2 . Une augmentation notable de 9.22% est enregistrée dans le secteur de l'électricité, soulignant une dépendance accrue aux sources d'énergie fossiles.

Nouveau-Brunswick Dans cette province, la production de charbon reste marginale en termes d'émissions (0.0007 mégatonnes), tandis que l'industrie lourde domine avec 10.18 mégatonnes de CO_2 . Une augmentation de 3.76% dans ce secteur met en évidence la nécessité d'investir dans des technologies plus propres.

Nouvelle-Écosse La production de charbon (0.0115 mégatonnes) est peu émissive, mais l'électricité reste le secteur principal avec 11.6716 mégatonnes. Une augmentation significative de 13.15% dans le secteur du pétrole et du gaz reflète une croissance dans les activités énergétiques de la région.

Ontario En Ontario, une hausse de 7.38% est observée dans le secteur de l'électricité, malgré des efforts pour réduire les émissions liées aux centrales au charbon. Cette augmen-

tation pourrait être liée à une demande accrue d'énergie électrique dans des secteurs comme le transport et l'industrie.

Québec Le Québec, avec une production énergétique largement hydroélectrique, affiche des niveaux d'émissions relativement faibles. Cependant, une augmentation de 5.90% est notée dans le secteur de l'électricité, ce qui pourrait être attribué à une croissance de la consommation énergétique dans d'autres secteurs comme le résidentiel et le transport.

Saskatchewan En Saskatchewan, la production de charbon est la source la moins émissive, tandis que l'industrie lourde enregistre une légère baisse de 3.30% dans ses émissions. Le secteur du pétrole et du gaz montre une augmentation de 9.20%, reflétant la croissance continue des activités d'extraction et de transformation dans la province.

2.2.2 Synthèse des résultats et tendances principales

Dans certaines provinces comme l'Alberta et le Québec, des réductions notables dans des secteurs historiquement polluants, tels que le charbon, témoignent des efforts pour diversifier les sources d'énergie et adopter des technologies plus propres. Cependant, des augmentations dans des secteurs comme l'électricité (Manitoba, Ontario, Québec) et le pétrole et le gaz (Nouvelle-Écosse, Saskatchewan) mettent en évidence les défis persistants pour aligner la croissance économique avec les objectifs climatiques.

Par ailleurs, les disparités régionales sont flagrantes, reflétant des contextes économiques, politiques et énergétiques variés. Par exemple, la Colombie-Britannique se distingue par ses faibles émissions dans le secteur de l'électricité grâce à son recours massif à l'hydroélectricité, tandis que l'Alberta reste fortement dépendante des combustibles fossiles.

Le modèle de classification k -means, appliqué dans cette analyse, a permis de regrouper les provinces selon leurs profils d'émissions et leurs contributions sectorielles. Cette approche statistique a révélé des schémas clairs, mettant en évidence les disparités entre les provinces et les secteurs. Grâce à cette classification, il est possible d'identifier les secteurs clés contribuant aux émissions de CO₂ dans chaque région, offrant une base solide pour élaborer des stratégies de réduction des émissions plus ciblées et adaptées.

Cette analyse fait état de l'importance de stratégies différenciées adaptées aux contextes régionaux et sectoriels. Par exemple:

- Dans les provinces riches en hydrocarbures (Alberta, Saskatchewan), des politiques axées sur la transition énergétique et l'innovation technologique seront essentielles pour réduire les émissions;
- Dans les provinces à faible intensité carbone (Québec, Colombie-Britannique), l'accent pourrait être mis sur l'électrification des transports et l'amélioration de l'efficacité énergétique;
- Pour les secteurs à forte croissance d'émissions (électricité, transports), des investissements dans les énergies renouvelables et les infrastructures de transport durable sont nécessaires.

Résultats *k*-means et interprétations des classes

Classement par région

Dans cette section, il sera appliqué la méthode de clustering *k*-means pour classer les régions canadiennes selon leurs niveaux d'émission de CO₂ par habitant sur une période de 22 ans, couvrant de 1997 à 2019. L'objectif est de regrouper les régions en fonction de leurs trajectoires d'émissions, permettant d'identifier des tendances communes et de fournir une base pour élaborer des politiques climatiques adaptées à chaque groupe.

Cette analyse tendra à identifier des schémas récurrents et des regroupements homogènes parmi les régions canadiennes et leurs principales sources d'émissions de GES. L'objectif est double:

- Fournir une compréhension simplifiée et synthétique des disparités régionales et sectorielles pour orienter les décideurs politiques ;
- Identifier des trajectoires communes qui peuvent inspirer des stratégies différenciées et adaptées pour réduire les émissions de CO₂.

L'utilisation du k -means répond à un besoin précis de structuration des données dans un contexte où les régions canadiennes et leurs secteurs économiques présentent des caractéristiques hétérogènes.

Cette méthode est particulièrement pertinente pour:

- Dégager des groupes homogènes permettant une analyse comparative efficace.
- Révéler des dynamiques sous-jacentes qui ne sont pas immédiatement visibles dans les données brutes.
- Servir de base pour des recommandations spécifiques, telles que l'intensification de l'électrification des transports dans les régions fortement émettrices ou le soutien accru à l'innovation dans les secteurs extractifs.

En regroupant les régions ou les secteurs selon leurs profils d'émissions, le K-means permet de relier les résultats directement aux politiques climatiques nécessaires pour atteindre les objectifs de réduction des émissions.

Méthodologie: Utilisation du critère de *Calinski-Harabasz* Le choix du nombre optimal de groupes a été guidé par le critère de Calinski-Harabasz, une mesure utilisée pour évaluer la qualité des clusters formés. Ce critère favorise les partitions où les groupes sont bien séparés les uns des autres tout en étant homogènes en leur sein. Les données longitudinales des émissions de CO₂ observées sur 11 régions ont révélé un score optimal pour un modèle à trois groupes, avec un score de 240. Ce score décroît lorsque le nombre de groupes dépasse trois, confirmant que cette classification est la plus appropriée.

Classification des régions: Trois groupes distincts Les régions canadiennes ont été réparties en trois groupes principaux selon leurs émissions de CO₂ par habitant:

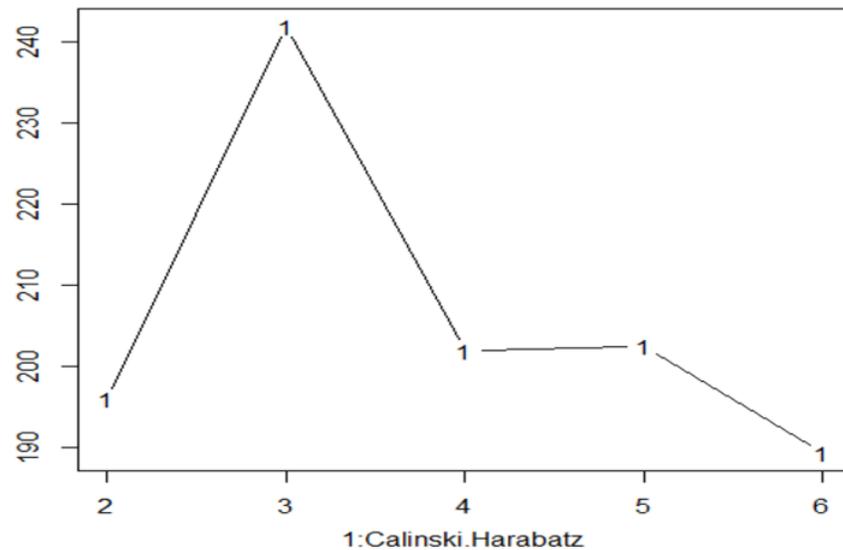


Figure 2.3 – Score de critère de Calinski-Harabasz pour les différents nombre des groupes obtenues

Table 2.2 – Émission de CO₂ par habitant pour les trois groupes (1997-2019)

Groupe	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	% de tous les régions
A	1.710	3.371	2.408	0.352	45.5%
B	1.201	2.243	1.614	0.261	36.4%
C	6.966	8.423	7.524	0.403	18.2%

- Groupe A: Régions à émissions modérées
 - Régions incluses: Manitoba, Nouveau-Brunswick, Terre-Neuve-et-Labrador, Nouvelle-Écosse et Yukon.
 - Caractéristiques: Ces régions représentent 45.5% des régions étudiées. Leur moyenne annuelle d'émissions de CO₂ par habitant est de 2.408 tonnes métriques. Les émissions dans ces régions proviennent principalement du secteur des transports et de l'industrie manufacturière.

- Groupe B: Régions à faibles émissions

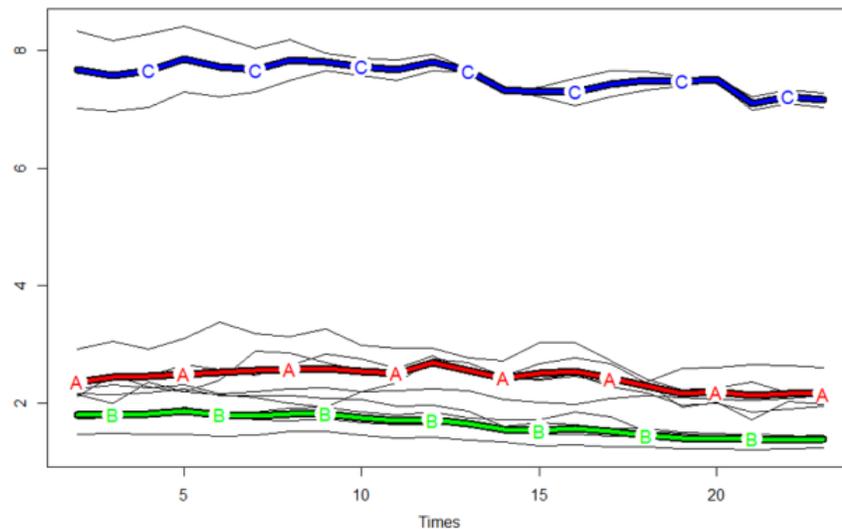


Figure 2.4 – Evolution annuelle moyenne d'émission de CO₂ par habitant pour les trois groupes régionaux obtenues par la méthode *k*-means (1997-2019).

- Régions incluses: Colombie-Britannique, Ontario, Île-du-Prince-Édouard et Québec.
- Caractéristiques: Ces régions, représentant 36.4% des régions étudiées, affichent une moyenne annuelle de 1.614 tonnes métriques par habitant. Ces faibles émissions s'expliquent en grande partie par des politiques environnementales robustes, comme l'adoption précoce de la taxe carbone en Colombie-Britannique et l'utilisation intensive de l'hydroélectricité au Québec.
- **Groupe C: Régions à fortes émissions**
 - Régions incluses: Alberta et Saskatchewan.
 - Caractéristiques: Ce groupe, représentant 18.2% des régions, se distingue par des émissions moyennes annuelles de 7.524 tonnes métriques par habitant. Ces régions sont caractérisées par une forte dépendance aux industries extractives, notamment l'exploitation des sables bitumineux et des centrales au charbon.

Analyse des trajectoires d'émissions La figure (??) illustre bibi les trajectoires annuelles moyennes des émissions de CO₂ par habitant pour les trois groupes entre 1997 et 2019. Bien que les trois groupes montrent une tendance générale à la baisse, l'ampleur de

cette décroissance varie considérablement:

- Groupe A: une décroissance progressive et régulière est observée, reflétant les efforts modérés pour réduire les émissions;
- Groupe B: les réductions sont plus marquées, en raison de politiques climatiques ambitieuses et d'une transition vers des sources d'énergie renouvelables;
- Groupe C: la décroissance est faible, mettant en évidence les difficultés structurelles et économiques des provinces fortement dépendantes des énergies fossiles.

Facteurs explicatifs

- Politiques publiques: les groupes B et A bénéficient de politiques plus strictes en matière de réduction des émissions, tandis que les provinces du groupe C sont limitées par la prédominance des industries extractives;
- Ressources énergétiques: les régions du groupe B, comme le Québec et la Colombie-Britannique, profitent de leur abondance en énergie hydroélectrique, réduisant leur dépendance aux combustibles fossiles;
- Structure économique: les groupes A et C, comprenant des provinces comme l'Alberta et la Saskatchewan, sont dominés par des industries énergivores, ce qui complique la transition énergétique.

Les regroupements identifiés grâce au K-means offrent des indications clés pour adapter les politiques climatiques:

- Groupe A (émissions modérées): ces régions, représentant près de 45% des provinces, nécessitent une meilleure gestion des transports et une augmentation de l'efficacité énergétique dans les industries;
- Groupe B (faibles émissions): les politiques environnementales avancées, comme l'adoption de la taxe carbone en Colombie-Britannique et le recours à l'hydroélectricité au Québec, peuvent être étendues à d'autres provinces pour maximiser leur impact;

- Groupe C (fortes émissions): une transition énergétique accompagnée est essentielle, notamment dans les industries extractives. Des subventions et des incitations fiscales pourraient encourager l'adoption de technologies plus propres.

Ces observations mettent en évidence l'importance d'une approche différenciée, tenant compte des spécificités régionales pour maximiser l'impact des politiques climatiques.

Implications pour les politiques climatiques

Stratégies ciblées Les résultats du clustering k -means mettent en évidence la nécessité d'adopter des approches spécifiques pour chaque groupe:

- Groupe A: les efforts doivent être centrés sur l'amélioration des infrastructures de transport et le soutien à l'efficacité énergétique dans l'industrie;
- Groupe B: ces régions peuvent continuer à capitaliser sur leurs avantages énergétiques en intensifiant l'électrification des transports et l'adoption de technologies propres;
- Groupe C: une transition progressive et accompagnée des industries extractives vers des alternatives plus durables est essentielle.

Les résultats suggèrent aussi l'intérêt d'introduire des incitations économiques, telles que des subventions pour les énergies renouvelables, des taxes carbone progressives, et des programmes de recyclage des revenus pour soutenir les régions fortement émettrices. Une meilleure coordination entre les provinces pourrait aussi permettre de partager les meilleures pratiques, comme l'intégration des marchés du carbone ou le financement conjoint de projets énergétiques verts.

Classement par source

Ici, il sera utilisé l'approche k -means pour classer les principales sources d'émission de CO₂ au Canada sur une période de 22 ans (1997-2019). Contrairement à l'analyse précédente qui classait les régions, cette analyse se concentre sur les neuf principales sources d'émissions:

agriculture, bâtiments, déchets, électricité, industrie lourde, industrie manufacturière légère, pétrole et gaz, et transports. Il sera question de regrouper ces sources en fonction de leurs profils d'émission afin de mieux comprendre les schémas sectoriels et d'identifier des stratégies spécifiques pour réduire les émissions.

Méthodologie: Application de k -means et critère de *Calinski-Harabasz* Pour cette analyse, le critère de *Calinski-Harabasz* a une nouvelle fois été utilisé pour déterminer le nombre optimal de groupes. Ce critère évalue la qualité des clusters en favorisant des regroupements compacts et bien séparés. Selon les résultats obtenus, le modèle optimal regroupe les neuf sources en cinq groupes distincts. La figure 2.6 illustre les scores de ce critère pour différents nombres de groupes, montrant une nette préférence pour cinq clusters.

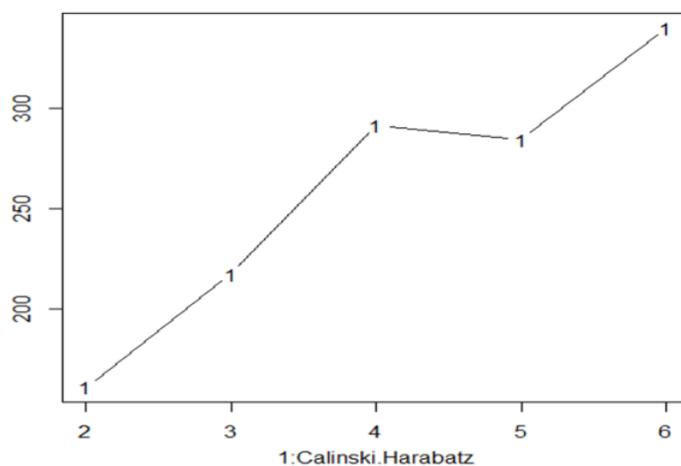


Figure 2.5 – Scores de critère de Calinski-Harabasz pour les différents nombre des groupes obtenus par la méthode k -means.

Résultats: Classification des sources d'émission Les sources d'émission ont été classées en cinq groupes selon leurs niveaux d'émission de CO_2 :

- Groupe A: Sources à faibles émissions

Ce groupe regroupe les sources ayant les plus faibles niveaux d'émission de CO_2 par habitant sur la période étudiée. Les secteurs inclus dans ce groupe sont généralement

des contributeurs mineurs aux émissions globales, en raison soit de leur faible intensité énergétique, soit de l'adoption précoce de pratiques durables.

- **Groupes B et D: Sources à émissions modérées**

Ces deux groupes regroupent les sources ayant des niveaux d'émission modérés. Bien que leurs contributions soient significatives, elles restent en dessous des niveaux observés pour les groupes à fortes émissions. Ces sources pourraient bénéficier de politiques ciblées pour réduire davantage leurs émissions sans impacts économiques majeurs.

- **Groupes C et E: Sources à fortes émissions**

Ces groupes incluent les secteurs les plus émetteurs de CO₂, représentant une proportion significative des émissions nationales. Le secteur de l'électricité est notamment classé dans le groupe E, avec une trajectoire décroissante significative au cours de la période (-0.1284), reflétant les efforts d'adoption des énergies renouvelables dans certaines régions.

Analyse des trajectoires d'évolution Les courbes d'évolution des émissions moyennes pour chaque groupe sont présentées dans la figure suivante. Elles mettent en évidence des dynamiques distinctes entre les groupes:

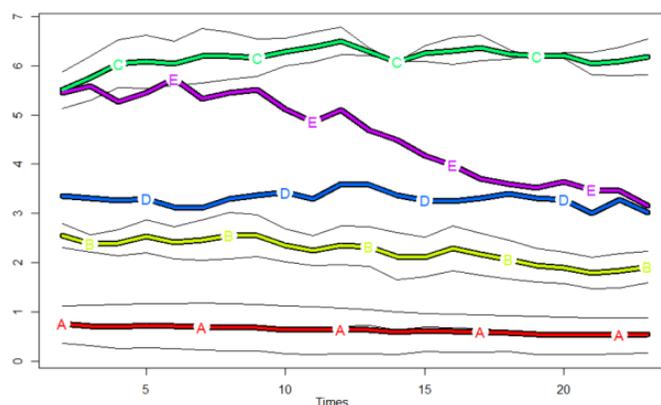


Figure 2.6 – Evolution annuelle moyenne d'émission de CO₂ par habitant pour les cinq groupes régionaux obtenues par la méthode *k*-means (1997-2019).

- Groupes A et B: ces groupes présentent des trajectoires décroissantes, bien que la réduction soit lente;
- Groupes C et D: les trajectoires sont linéaires et stables, avec des pentes quasi nulles, indiquant un statu quo dans les émissions;
- Groupe E (secteur de l'électricité): ce groupe se distingue par une décroissance linéaire significative, avec une pente de -0.1284, suggérant des progrès constants dans la transition énergétique.

Table 2.3 – Résultats de l'émission de CO₂ pour les cinq groupes des sources (1997-2019)

Groupe	% de tous les sources	Sources	Moyenne d'émission de CO ₂	Pente de la trajectoire	Conclusion
A	22.2%	Déchets, industrie légère, production de charbon	0.623	-0.0102** (<i>p</i> -value=0)	Décroissance faible
B	22.2%	Bâtiments, industrie lourde	2.224	-0.0336** (<i>p</i> -value=0)	Décroissance faible
C	11.1%	Pétrole et gaz, transports	6.153	0.01240 (<i>p</i> -value=0.053)	Stabilité modérée
D	11.1%	Agriculture	3.293	-0.0044 (<i>p</i> -value=0.33)	Stabilité faible
E	11.1%	Électricité	4.515	-0.1284** (<i>p</i> -value=0)	Décroissance forte

Le tableau 2.3 résume les caractéristiques principales de chaque groupe, notamment les pentes des trajectoires et les émissions moyennes annuelles. Ces résultats montrent que les émissions des groupes A et B décroissent légèrement, tandis que celles des groupes C et D restent stables. Le groupe E affiche la diminution la plus marquée.

Interprétation des résultats Les résultats montrent des disparités importantes entre les sources d'émission. Le classement en cinq groupes offre une compréhension approfondie des dynamiques sectorielles:

- Électricité (Groupe E): bien que classé parmi les sources à fortes émissions, ce secteur montre une réduction constante grâce à l'adoption croissante des énergies renouvelables. Les politiques provinciales, comme la transition vers l'hydroélectricité au Québec et la fermeture des centrales au charbon en Ontario, expliquent en grande partie cette tendance;
- Transport et pétrole et gaz (Groupes C et D): ces secteurs restent parmi les plus grands contributeurs, avec peu de changements observés au fil du temps. Cela souligne la nécessité d'introduire des politiques plus ambitieuses, telles que l'électrification des transports et des réglementations plus strictes pour l'industrie des hydrocarbures;
- Industrie manufacturière et agriculture (Groupes A et B): ces secteurs, bien que moins émissifs, peuvent bénéficier d'innovations technologiques et d'incitations financières pour adopter des pratiques plus durables.

Implications pour les politiques climatiques Les résultats de cette analyse font état de l'intérêt d'une approche différenciée pour réduire les émissions:

- Groupe A: continuer à encourager les pratiques durables et les innovations technologiques;
- Groupes B et D: mettre en place des incitations pour adopter des technologies à faible émission et renforcer les normes environnementales;
- Groupes C et E: investir massivement dans la transition énergétique, avec un focus particulier sur l'électrification et la décarbonisation des processus industriels.

Les progrès réalisés dans le groupe E montrent que les investissements dans les énergies renouvelables sont efficaces pour réduire les émissions. Cette approche devrait être élargie à d'autres secteurs, en particulier les transports et l'industrie lourde. Par ailleurs, une

meilleure coordination entre les secteurs pourrait permettre de partager les meilleures pratiques, comme l'efficacité énergétique et l'électrification. Par exemple, l'adoption de technologies vertes dans l'industrie manufacturière pourrait inspirer des transformations similaires dans l'industrie lourde.

Classement par source et par région

Dans cette section, il sera appliqué la méthode k -means longitudinale pour classer les suivis combinant à la fois les régions et les sources d'émissions de CO₂ au Canada. Contrairement aux analyses précédentes, cette approche intégrée prend en compte les disparités régionales et sectorielles pour identifier des schémas d'émissions plus détaillés. Notre jeu de données se compose de 99 suivis correspondant à neuf sources d'émissions observées dans onze régions, sur une période de 22 ans (1997-2019).

En utilisant le critère de *Calinski-Harabasz*, nous avons déterminé que le nombre optimal de clusters était de six groupes. Ce choix garantit des regroupements homogènes tout en maintenant une séparation claire entre les clusters. La figure 2.8 illustre les scores du critère pour différents nombres de groupes, confirmant que six clusters offrent le meilleur équilibre.

Résultats: Classification en six trajectoires Les trajectoires identifiées par l'analyse k -means révèlent des schémas distincts d'émissions de CO₂, qui varient selon les secteurs et les régions. Les six groupes se distinguent par leurs niveaux d'émissions et leurs tendances d'évolution.

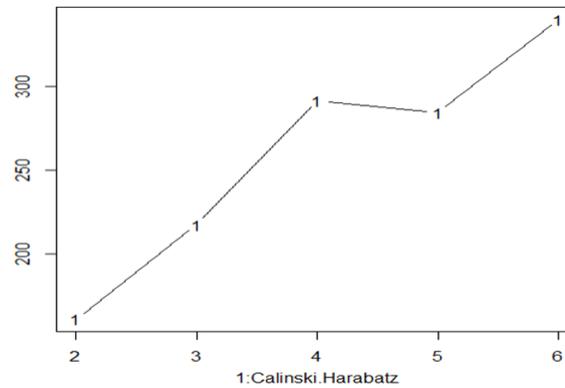


Figure 2.7 – Scores de critère de Calinski-Harabasz pour les différents nombre des groupes obtenus par la méthode k -means.

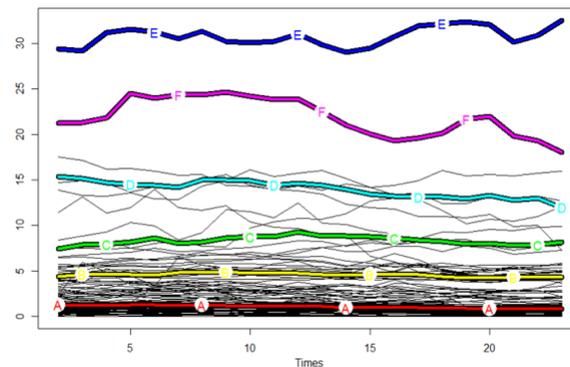


Figure 2.8 – Evolution annuelle moyenne d'émission de CO₂ par habitant pour les cinq groupes des sources obtenus par la méthode k -means (1997-2019)

Trajectoire A: Très faibles émissions

- Proportion: 61 suivis (61.5% de l'échantillon);
- Moyenne annuelle: 0.864 tonne métrique par habitant;
- Tendances: émissions très faibles et stables sur la période;
- Secteurs principaux: industrie légère, gestion des déchets, production de charbon;
- Régions principales: Île-du-Prince-Édouard, Yukon, Colombie-Britannique.

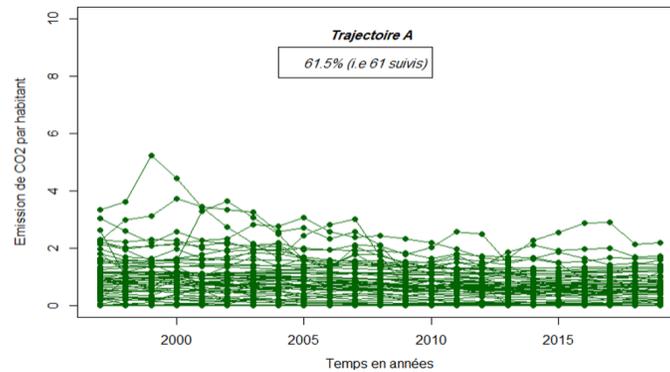


Figure 2.9 – Groupe de trajectoire A obtenue par k -means

Trajectoire B: Faibles émissions

- Proportion: 23 suivis (23.2% de l'échantillon);
- Moyenne annuelle: 3.68 tonnes métriques par habitant;
- Tendence: émissions légèrement plus élevées que la trajectoire A, avec une décroissance modérée;
- Secteurs principaux: transport dans des régions comme le Québec et l'Ontario.

Les suivis de ce groupe reflètent des efforts constants de réduction des émissions, notamment grâce à des politiques climatiques avancées comme la taxe carbone en Colombie-Britannique et le marché du carbone au Québec.

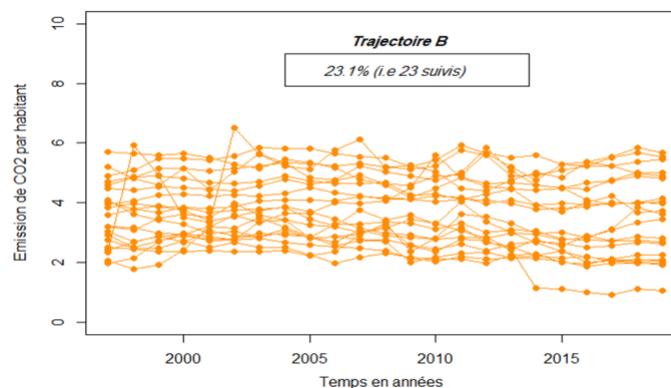


Figure 2.10 – Groupe de trajectoire B obtenue par k -means

Trajectoire C: Émissions modérées avec tendance baissière

- Proportion: 10 suivis (10.1% de l'échantillon);
- Moyenne annuelle: 7.53 tonnes métriques par habitant;
- Tendance: une tendance haussière avant 2005, suivie d'une décroissance notable après 2005;
- Secteurs principaux: transports et industrie lourde dans des régions comme le Manitoba et le Nouveau-Brunswick.

Cette trajectoire est associée à des secteurs ayant bénéficié de réformes politiques après 2005, comme l'électrification partielle des transports ou la modernisation des infrastructures industrielles.

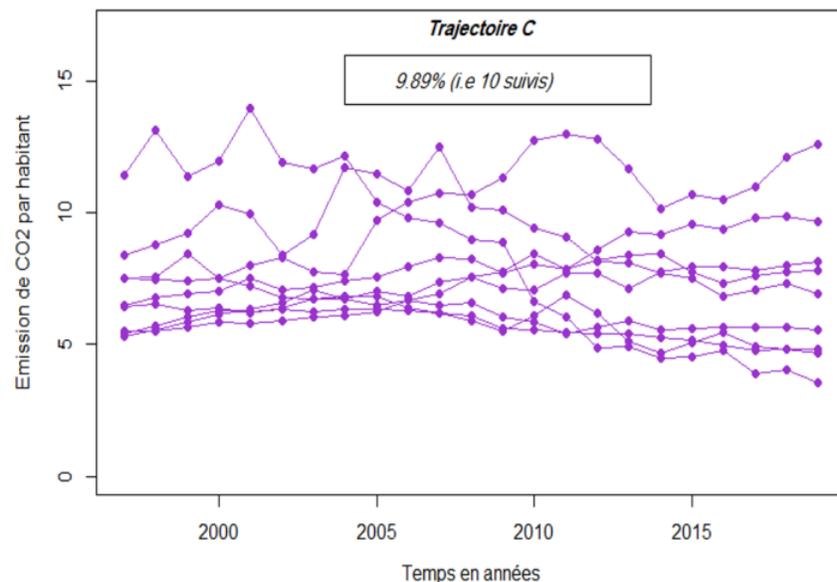


Figure 2.11 – Groupe de trajectoire C obtenue par *k*-means

Trajectoire D: Émissions modérées avec décroissance lente

- Proportion: 3 suivis (3.3% de l'échantillon);

- Moyenne annuelle: 13.89 tonnes métriques par habitant;
- Tendance: décroissance lente mais continue depuis 1997;
- Secteurs principaux: électricité et agriculture en Alberta et Saskatchewan.

Cette trajectoire reflète les défis structurels des régions fortement dépendantes des énergies fossiles, bien que des efforts de transition soient perceptibles.

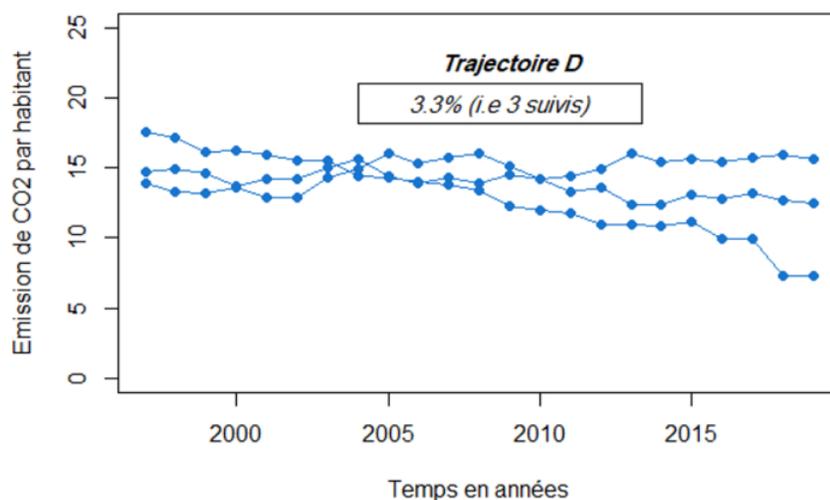


Figure 2.12 – Groupe de trajectoire D obtenue par *k*-means

Trajectoire E: Fortes émissions avec stabilité

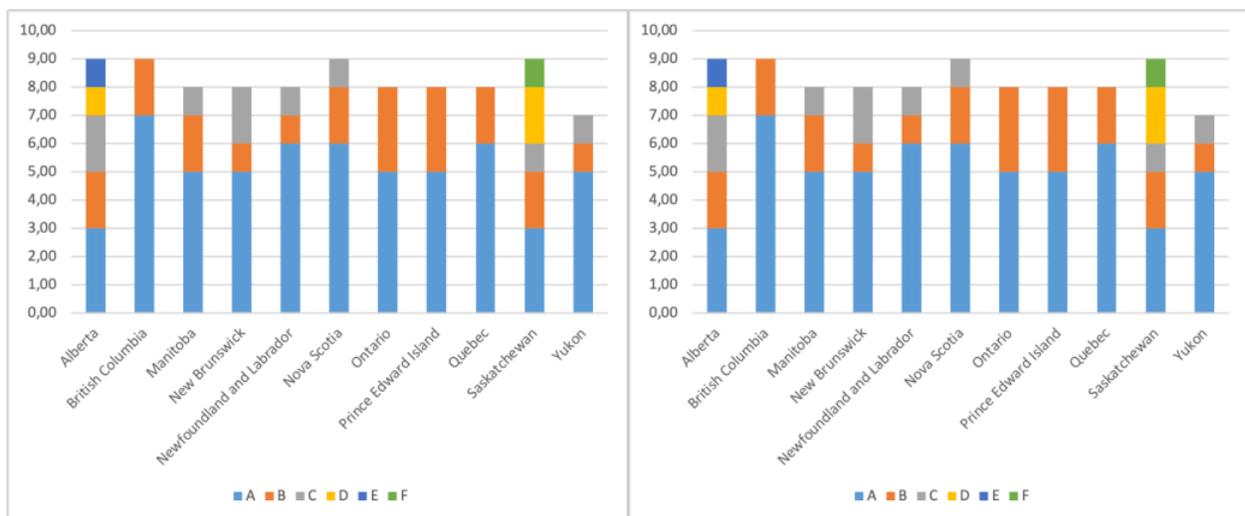
- Proportion: 1 suivi (1.1% de l'échantillon);
- Moyenne annuelle: 21.68 tonnes métriques par habitant;
- Tendance: émissions élevées, stables sur la période;
- Secteurs principaux: pétrole et gaz en Alberta.

Cette trajectoire illustre la contribution disproportionnée de l'industrie pétrolière et gazière en Alberta, soulignant l'urgence d'une transition énergétique dans cette région.

Trajectoire F: Très fortes émissions avec décroissance

- Proportion: 1 suivi (1.1% de l'échantillon);
- Moyenne annuelle: 17.1 tonnes métriques par habitant;
- Tendances: une baisse marquée des émissions (21.22 tonnes en 1997 à 17.1 tonnes en 2019);
- Secteurs principaux: pétrole et gaz en Saskatchewan.

Bien que les émissions restent élevées, la réduction observée reflète les premières étapes d'une transition énergétique.



Interprétation et implications pour les politiques climatiques

Secteurs et régions prioritaires

- Pétrole et gaz (E, F): ces trajectoires mettent en évidence la contribution majeure des industries extractives en Alberta et Saskatchewan. Des politiques de tarification du carbone et des incitations pour les énergies renouvelables sont essentielles pour réduire leur impact;

- Transport (B, C): bien que les émissions soient modérées, ces trajectoires soulignent l'importance de l'électrification des transports et du développement des infrastructures de transport public;
- Électricité (D): les trajectoires stables mais élevées dans certaines régions nécessitent une accélération de la transition énergétique, notamment dans les provinces encore dépendantes des centrales au charbon.

Approches ciblées Les résultats de cette analyse révèlent l'importance d'une stratégie différenciée, combinant:

- Des politiques spécifiques aux secteurs: par exemple, des incitations pour les technologies propres dans le secteur pétrolier et gazier ou des subventions pour l'efficacité énergétique dans le bâtiment;
- Des mesures régionales: les provinces à fortes émissions doivent bénéficier d'un soutien financier et technologique accru pour accélérer leur transition.

Les secteurs identifiés avec de faibles émissions (industrie légère, déchets) peuvent servir de modèle pour développer des pratiques durables dans les industries plus intensives.

2.3 Règlementation sur les émissions de carbone au Canada

L'élaboration de l'*approche pancanadienne pour une tarification de la pollution par le carbone* en 2016 a marqué une étape importante dans l'histoire de la lutte contre les changements climatiques au Canada (Gouvernement du Canada, 2021). Ce projet résulte d'une collaboration intergouvernementale, avec une reconnaissance explicite du rôle clé des provinces dans la protection du climat. En rompant avec la dynamique fédérale-provinciale traditionnelle, il met en avant trois mécanismes principaux de tarification du carbone en vigueur dans le pays: le système de plafonnement et d'échange des émissions de GES (SPEDE), la taxe carbone, et le système de tarification fondé sur le rendement.

Ici, il sera exploré en détail la mise en œuvre et l'évolution de ces politiques, en mettant un accent particulier sur le rôle des provinces et des initiatives interrégionales comme la

Western Climate Initiative (WCI).

2.3.1 Système de plafonnement et d'échange (WCI)

Origines de la Western Climate Initiative (WCI) Face à l'absence d'une réglementation nationale stricte sur les émissions de gaz à effet de serre (GES) aux États-Unis au début des années 2000, des initiatives régionales ont vu le jour. La West Coast Global Warming Initiative, lancée en 2003 par la Californie, l'Oregon et l'État de Washington, a évolué pour devenir la Western Climate Initiative (WCI) en 2006 (Warren & Tomashefsky, 2009). Ce partenariat s'est fixé pour objectif une réduction de 15% des émissions en dessous des niveaux de 2005 d'ici 2020, en adoptant le plafonnement et l'échange comme stratégie centrale (Warren & Tomashefsky, 2009).

En 2008, l'initiative a pris une dimension internationale avec l'intégration de provinces canadiennes telles que la Colombie-Britannique, le Manitoba, l'Ontario et le Québec. Cependant, la nature volontaire de l'accord a conduit à des engagements variables au fil du temps, et plusieurs États américains se sont retirés dès 2010 (Fertel et al., 2013).

Mise en place du SPEDE au Canada Le Québec a été une des premières provinces canadiennes à mettre en œuvre un système de plafonnement et d'échange, en vigueur depuis le 1^{er} janvier 2013. La signature d'une entente d'harmonisation avec la Californie en septembre 2013 a permis de créer un marché régional nord-américain du carbone, opérationnel dès le 1^{er} janvier 2014 (Roch & Papy, 2019). À ce jour, le Québec et la Californie restent les seuls participants actifs de ce marché intégré, bien que 11 États y aient initialement participé lors de sa création.

Implication de l'Ontario et de la Nouvelle-Écosse L'Ontario a également tenté d'intégrer ce marché en adoptant une loi sur le plafonnement et l'échange en 2016. Une entente avec le Québec et la Californie a été signée en 2017, mais l'élection du premier ministre Doug Ford en 2018 a conduit à l'annulation rapide du programme (Chaloux et al., 2021). Cette décision a également provoqué la suspension de l'intégration du marché ontarien par les autorités québécoises et californiennes.

La Nouvelle-Écosse, quant à elle, a choisi une approche indépendante. En 2018, la province a engagé la WCI Inc. pour mettre en place son propre programme provincial de plafonnement et d'échange, opérationnel depuis 2019. Contrairement au Québec, elle ne vise pas à intégrer le marché nord-américain (Nova Scotia, 2018).

Analyse des résultats et défis du SPEDE

Réussites du marché commun Québec-Californie Le SPEDE a permis de réduire les émissions dans les secteurs clés, notamment l'industrie lourde et l'électricité (Blais, 2024). Grâce à une collaboration efficace entre le Québec et la Californie, le marché a établi un prix stable pour le carbone, ce qui favorise ainsi l'investissement dans des technologies plus propres.

Problèmes de fragmentation Cependant, la nature volontaire de la WCI a entraîné une fragmentation des engagements. Par exemple, le retrait de l'Ontario en 2018 et l'absence d'harmonisation avec d'autres provinces, comme la Colombie-Britannique et la Nouvelle-Écosse, limitent l'efficacité du marché à l'échelle nationale (Belzile, 2018).

Résistance politique Les résistances politiques, comme celles observées en Ontario, montrent que l'adoption et le maintien des politiques de plafonnement et d'échange dépendent fortement des majorités politiques provinciales. Cette volatilité complique la mise en œuvre de stratégies cohérentes à long terme.

2.3.2 Le choix d'une taxe carbone

La Colombie Britannique En 2008, la Colombie-Britannique est devenue la première province canadienne à instaurer une taxe carbone couvrant de nombreux secteurs, y compris le chauffage, l'électricité et les transports (ICI.Radio-Canada.ca, 2024). Cette taxe, qui était progressive, visait à établir un prix clair et cohérent du carbone tout en redistribuant intégralement les fonds collectés aux particuliers et aux entreprises. Cette approche avait pour objectif d'encourager des réductions visibles des émissions sans pénaliser le pouvoir d'achat des citoyens ni la compétitivité des entreprises (Pretis, 2022).

Évolution de la taxe carbone

- 2008: la taxe est introduite avec un prix initial de 10\$ par tonne de CO₂;
- 2012: après une augmentation annuelle de 5\$ par tonne, la taxe atteint 30\$ par tonne;
- 2012-2018: une stagnation est observée, avec le prix restant à 30\$ par tonne durant cette période;
- 2018-20214: des augmentations planifiées permettent d'atteindre 50\$ par tonne en 2021.

Cette trajectoire reflète la volonté de la province de renforcer progressivement l'impact de la taxe tout en maintenant une acceptabilité sociale et économique. Le système de redistribution intégrale des recettes est une caractéristique clé, offrant un modèle que d'autres juridictions pourraient adopter.

Impacts environnementaux et économiques

- Réduction des émissions: les données montrent une diminution significative des émissions de GES, notamment dans les secteurs des transports et de l'énergie;
- Croissance économique soutenue: contrairement aux craintes initiales, la Colombie-Britannique a maintenu une croissance économique robuste, prouvant que la taxe carbone pouvait coexister avec une économie dynamique;
- Innovation technologique: la taxe a stimulé l'innovation dans les technologies propres, renforçant la transition énergétique.

Cependant, des critiques subsistent concernant son impact limité sur certains secteurs, notamment l'exploitation des ressources naturelles, qui reste une source majeure d'émissions.

Québec

En 2007, le Québec a introduit la première taxe carbone au Canada, marquant une étape importante dans la lutte contre les changements climatiques (DeLottinville, 2021). Contrairement à la Colombie-Britannique, cette taxe était plus ciblée, s'appliquant principalement à la vente au détail d'essence et aux grands producteurs de pétrole.

Caractéristiques de la taxe

- Prix initial: la taxe était fixée à 0,8 cent par litre d'essence et 0,9 cent par litre de diesel;
- Secteurs concernés: environ 50 grandes entreprises énergétiques étaient directement impactées, représentant les principaux producteurs et importateurs de pétrole;
- Produits inclus: outre les combustibles fossiles, la taxe s'appliquait également aux secteurs des mines, du ciment et de la centrale thermique de Tracy (propriété d'Hydro-Québec), fermée en 2011 (Lambert, 2015).

Cette taxe, bien que modeste en termes de montant, visait à sensibiliser les entreprises et les consommateurs tout en générant des fonds pour financer des initiatives de réduction des émissions. En 2013, la taxe carbone a été retirée et remplacée par le Système de plafonnement et d'échange des émissions de GES (SPEDE) (Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs, s. d.). Ce changement reflétait une volonté d'adopter une approche plus intégrée et en phase avec les marchés internationaux du carbone.

Impacts et limites

- Réduction des émissions: bien que la taxe ait contribué à une baisse modérée des émissions, son impact a été limité par son montant relativement faible;
- Acceptabilité sociale: l'opinion publique était divisée, certains craignant que les entreprises ne transfèrent les coûts aux consommateurs en augmentant les prix des produits de base;
- Transition vers le SPEDE: L'adoption du SPEDE a permis au Québec de s'aligner sur les initiatives internationales, notamment avec la Californie.

2.3.3 Système basé sur les prélèvements sur les émissions et le rendement

Alberta

Mise en œuvre du SGER En 2007, l'Alberta a mis en place le Règlement sur les émetteurs de gaz spécifiés (SGER), une politique pionnière visant à réduire l'intensité des émissions des grands émetteurs industriels (I4CE, 2015). Contrairement aux systèmes de plafonnement, le SGER ne fixe pas un plafond fixe sur les émissions totales, mais impose une réduction de 12% de l'intensité des émissions (émissions par unité de production) par rapport à une période de référence. Cette réglementation s'applique aux établissements émettant plus de 100000 tonnes de CO₂ équivalent (Dobson & Winter, 2015).

Les entreprises réglementées disposent de plusieurs options pour se conformer à ces exigences:

- Réduire l'intensité de leurs émissions par des investissements dans des technologies plus propres;
- Acheter des crédits compensatoires obtenus grâce à des réductions d'émissions ailleurs.
- Contribuer au fonds technologique de l'Alberta, avec un tarif initial de 15\$/tCO₂ équivalent, pour soutenir les initiatives de développement durable.

Cette flexibilité permet aux entreprises de choisir des options adaptées à leurs réalités opérationnelles, tout en contribuant à la réduction globale des émissions.

Introduction et évolution de la taxe carbone En 2015, le gouvernement du Nouveau Parti démocratique (NPD), sous la direction de Rachel Notley, a introduit une taxe carbone provinciale visant à compléter le SGER (ICI.Radio-Canada.ca, 2015). Cette taxe avait pour objectif d'augmenter le coût des émissions à 20\$/tCO₂ équivalent en 2017, puis à 30\$/tCO₂ équivalent en 2018. Elle s'appliquait à plusieurs secteurs, notamment les combustibles fossiles et les transports, afin d'élargir la portée des efforts climatiques de la province.

Cependant, l'élection du Parti conservateur uni (PCU), dirigé par Jason Kenney, en 2019, a conduit à l'abrogation de cette taxe carbone provinciale (ICI.Radio-Canada.ca, 2019). Ce

changement politique reflète les défis liés à la continuité des politiques climatiques dans un contexte de priorités partisanes divergentes.

Analyse des impacts du SGER et de la taxe carbone

Réduction des émissions Le SGER a permis de réduire l'intensité des émissions dans certains secteurs, notamment dans les industries lourdes. Cependant, son impact global reste limité en l'absence d'un plafond strict sur les émissions totales. Les crédits compensatoires et le fonds technologique ont encouragé des investissements dans les technologies propres, bien que ces efforts n'aient pas suffi à réduire significativement les émissions absolues de la province.

Acceptabilité sociale et économique La taxe carbone de 2015 a rencontré une opposition notable, en particulier parmi les groupes industriels et certains segments de la population (Weber, 2019). Cette opposition a été exacerbée par la perception d'un fardeau économique accru pour les ménages et les entreprises, bien que des mécanismes de compensation aient été prévus.

Dans tous les cas, le SGER se distingue par sa flexibilité, permettant aux entreprises de choisir parmi plusieurs options de conformité. Cette approche est bien adaptée à une province fortement dépendante des ressources naturelles, comme l'Alberta, où les industries extractives représentent une part importante de l'économie.

Chapitre 3

Méthodologie, Analyse et interprétation des résultats

3.1 Méthodologie

3.1.1 Spécification du modèle

Cette étude se concentre sur l'analyse de l'impact des politiques de tarification du carbone, en particulier la taxe carbone et les systèmes de plafonnement et d'échange (SPEDE), sur les émissions de gaz à effet de serre (GES) dans les provinces canadiennes. Les données utilisées couvrent une période de 20 ans (1997-2017), ce qui permet de capturer les dynamiques à moyen et long terme des émissions en fonction de l'évolution des politiques climatiques. Les données proviennent principalement de Statistique Canada et incluent des informations sur plusieurs dimensions économiques, industrielles et environnementales. Cette approche permet d'étudier l'effet différencié des politiques climatiques en prenant en compte les disparités provinciales et sectorielles.

Variables utilisées

- Variable dépendante: les émissions de GES (en tonnes métriques): ces données mesurent les émissions totales des provinces. Elles représentent un indicateur direct de l'impact des politiques climatiques sur la pollution atmosphérique.

- Variables explicatives:
 - le produit intérieur brut est utilisé comme proxy pour la croissance économique et l'activité industrielle. Il permet d'évaluer si les politiques climatiques influencent les émissions malgré une augmentation du PIB;
 - Investissements en recherche et développement (R&D): ces données capturent les efforts technologiques et d'innovation, essentiels pour réduire les émissions via l'adoption de technologies propres;
 - Intensité industrielle: mesurée par la part de l'industrie dans le PIB provincial, elle permet de comprendre le poids des activités industrielles dans la production des émissions;
 - Taux d'urbanisation: cet indicateur reflète la densité des activités économiques et la concentration des populations dans les zones urbaines, influençant la consommation d'énergie et les émissions;
 - Taux d'alphabétisation: Utilisé comme proxy pour mesurer la sensibilisation environnementale et l'adoption de comportements durables, ce taux permet également d'identifier l'influence des capacités humaines sur la transition énergétique.

Justification des choix de variables Les variables explicatives ont été sélectionnées en fonction de leur pertinence théorique et empirique dans la littérature économique et environnementale. La consommation énergétique, initialement incluse, a été retirée après réflexion. Toutefois, son effet est indirectement capturé par l'intensité industrielle et le PIB. Le taux d'alphabétisation, bien que rarement utilisé dans les études économétriques, est introduit ici pour tester son rôle potentiel dans la réduction des émissions via une meilleure sensibilisation et éducation.

Modèle économétrique L'impact des politiques climatiques est analysé à l'aide d'un modèle de différences en différences (DID). Initialement introduite par Ashenfelter & Card (1986) et améliorée par des contributions ultérieures (Meyer, 1991; Bertrand, 2009; Donald & Lang, 2007), cette méthode est particulièrement pertinente dans le cadre de cette étude,

car elle permet d'isoler l'effet causal des politiques climatiques en comparant les trajectoires des émissions entre les provinces ayant adopté ces politiques (groupe traité) et celles ne les ayant pas adoptées (groupe de contrôle).

L'équation générale du modèle DID est spécifiée comme suit:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 D + \beta_2 T + \beta_3 DT + \mu,$$

avec

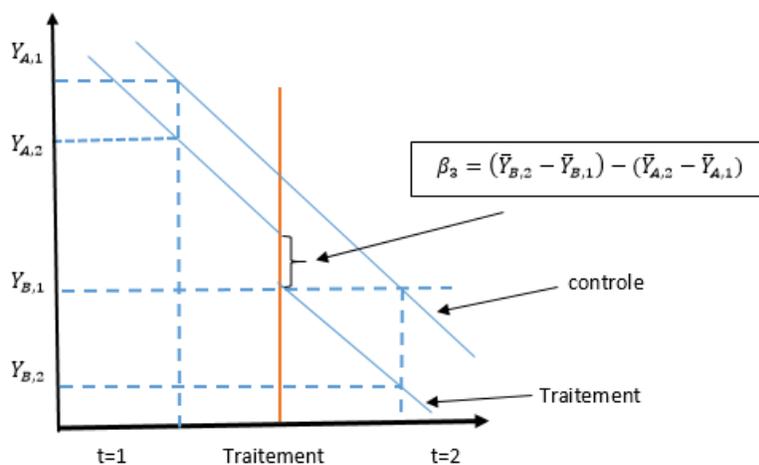
- Y : Variable dépendante (émissions de CO_2);
- β_1 : La différence initiale (l'effet marginal de D à $T = 0$);
- β_2 : Le changement dû au temps (effet marginal de T à $D = 0$);
- β_3 : L'effet du traitement;
- D est la variable binaire identifiant le segment d'analyse individuelle. Elle prend la valeur 1 pour les individus appartenant au groupe de traitement et 0 pour ceux du groupe de contrôle;
- $D = 0$ pour l'Ontario; la Nouvelle-Écosse; le Saskatchewan, le Nouveau-Brunswick; l'Île-du-Prince-Édouard et le Yukon;
- $D = 1$ pour l'Alberta; le Manitoba; la Colombie-Britannique et le Québec (voir le tableau 10);
- T : représente également une variable binaire dénotant les changements temporels. Sa valeur est 1 lorsqu'une période intègre un traitement et 0 dans le cas contraire;
- DT : indique les effets résultant à la fois du temps et des individus. Elle est égale à 1 lorsque les variables D et T sont simultanément à 1;
- μ : Est le facteur représentant le terme d'erreur modélisé comme suit: $\mu_{it} = \alpha_i + \theta_t$ ou α_i est le terme d'erreur dû au temps et θ_t est le terme d'erreur dû à la spécificité individuelle.

Groupes d'analyse Les provinces canadiennes sont réparties en deux groupes pour cette analyse:

- Groupe traité ($D = 1$): Alberta, Manitoba, Colombie-Britannique, Québec;
- Groupe de contrôle ($D = 0$): Ontario, Nouvelle-Écosse, Saskatchewan, Nouveau-Brunswick, Île-du-Prince-Édouard, Yukon.

Le tableau ci-dessous illustre la décomposition des effets avant et après le traitement:

Période	Control A	Control B	Effet total
Prétraitement	$Y_{(A,1)}$	$Y_{(B,1)}$	$Y_{(B,1)}$
Posttraitement	$Y_{(A,2)}$	$Y_{(B,2)}$	$Y_{(B,1)} + (Y_{(A,2)} - Y_{(A,1)})$



L'effet du traitement est alors mesuré par:

$$\Delta(Y) = (Y_{(B,2)} - Y_{(B,1)}) - (Y_{(A,2)} - Y_{(A,1)})$$

Hypothèses du modèle DID

- Hypothèse de tendance parallèle: les émissions de CO₂ des groupes traité et de contrôle auraient évolué de manière similaire sans l'introduction de la politique.

$$\mathbb{E}\left[Y_{(B,2)}(0) - Y_{(B,1)}(0)\right] = \mathbb{E}\left[Y_{(A,2)}(0) - Y_{(A,1)}(0)\right]$$

- Hypothèse de non-anticipation: la politique étudiée n'a pas d'effet sur les comportements avant son implémentation.

3.1.2 Constitution des groupes

Les provinces canadiennes sont classées en deux groupes pour l'analyse DID:

- Groupe traité ($D = 1$): Provinces ayant adopté des politiques climatiques explicites avant 2017. Cela inclut:
 - Colombie-Britannique: taxe carbone introduite en 2008;
 - Québec: système de plafonnement et d'échange (SPEDE) mis en œuvre en 2013;
 - Alberta: politique de tarification du carbone à partir de 2007;
 - Manitoba: Taxe carbone introduite en 2012.
- Groupe de contrôle ($D = 0$): Provinces sans politiques climatiques explicites avant 2017.
 - Ontario, Saskatchewan, Nouvelle-Écosse, Yukon, Île-du-Prince-Édouard, Nouveau-Brunswick.

Les provinces du groupe traité ont adopté des politiques variées mais cohérentes avec les objectifs de réduction des GES. En revanche, le groupe de contrôle permet d'évaluer les tendances naturelles des émissions en l'absence de politiques explicites.

3.1.3 Tests de spécification du modèle

Avant d'estimer le modèle DID, plusieurs tests de robustesse et de validation ont été réalisés pour garantir la fiabilité des résultats.

Stationnarité des séries Les séries temporelles ont été testées à l'aide des tests Dickey-Fuller Augmenté (ADF) et Levin-Lin-Chu (LLC). Ces tests permettent de vérifier l'absence de racines unitaires, condition essentielle pour éviter les biais liés à des tendances temporelles non stationnaires.

Résultats Les émissions de GES, le PIB, et l'intensité industrielle sont stationnaires après différenciation première ($I(1)$); les variables R&D et alphabétisation sont stationnaires au niveau ($I(0)$).

Table 3.1 – résultats du test de stationnarité

Variables	LLC Test			IPS Test		
	Statistiques	probabilité	Ordre d'intégration	Statistiques	Probabilité	Ordre d'intégration
lnPib	-1.7823	0.0374	I(1)	-2.0096	0.0222	I(1)
RD	-2.4721	0.0067	I(0)	-2.2500	0.0122	I(0)
educ	-3.6802	0.0001	I(1)	-3.2631	0.0006	I(1)
Y	-4.0727	0.0000	I(0)	-11.7241	0.0000	I(0)
Pop	-7.2471	0.0000	I(1)	-5.0014	0.0000	I(1)
indus	-2.9802	0.0014	I(1)	-4.4890	0.0000	I(1)

Source: Auteur

Multicolinéarité Le test du Variance Inflation Factor (VIF) a été appliqué pour détecter d'éventuelles corrélations excessives entre les variables explicatives.

Résultats Toutes les variables ont des VIF inférieurs à 2, indiquant une absence de multicolinéarité préoccupante.

Table 3.2 – Test de variable instrumentale

variables	VIF	1/Vif
D(lnpib)	1.54	0.648211
D(pop)	1.43	0.697982
D1(educ)	1.33	0.753813
RD	1.15	0.870119
Y	1.06	0.939600
D(indus)	1.05	0.956013
Mean	VIF	1.23

Source: Auteur

Hétéroscédasticité Le test de White a été utilisé pour vérifier la constance des variances des résidus.

Résultats Une hétéroscédasticité significative a été détectée. Des erreurs-types robustes ont été appliquées pour corriger ce problème.

Table 3.3 – Résultat test d'hétéroscédasticité

Chi-2	Stat	Prob.
61.62	23	0.0036

Source: Auteur

Autocorrélation Le test de Breusch-Godfrey a été réalisé pour identifier une dépendance temporelle des résidus.

Résultats Une autocorrélation des erreurs a été détectée, nécessitant l'ajustement des estimations.

Table 3.4 – Table test d'autocorrelation

LM-Stat	retard	Probabilité
37.365	1	0.0000
37.371	2	0.0000
38.114	3	0.0000
40.580	4	0.0000
41.741	5	0.0000
42.541	6	0.0000
42.621	7	0.0000

Source: Auteur

Tendance parallèle L'hypothèse fondamentale du modèle DID suppose que les trajectoires des groupes traité et de contrôle seraient parallèles en l'absence de traitement. Cela a été vérifié graphiquement et statistiquement.

Résultats Les tendances avant l'introduction des politiques sont parallèles entre les deux groupes, validant l'applicabilité du modèle DID.

3.2 Résultats et discussions

Cette section présente les résultats des différents tests de spécification appliqués au modèle utilisé dans cette étude. Ces tests permettent de valider la robustesse et la fiabilité des estimations effectuées, tout en s'assurant que les hypothèses fondamentales du modèle économétrique sont respectées.

3.2.1 Stationnarité

La stationnarité des séries est une condition essentielle pour garantir la validité des estimations économétriques. Pour vérifier cette propriété, des tests de racines unitaires ont été

appliqués, notamment le test de Dickey-Fuller Augmenté (ADF) et le test Levin-Lin-Chu (LLC), adaptés pour les données en panel. Ces tests permettent d'évaluer si les variables présentent une tendance non stationnaire, pouvant fausser les résultats du modèle.

Résultats des tests:

- Les émissions de GES, variable dépendante, sont stationnaires au niveau ($I(0)$), ce qui signifie qu'elles ne nécessitent pas de différenciation pour stabiliser la variance et la moyenne;
- Les variables explicatives, à l'exception des émissions de GES, présentent une stationnarité après différenciation première ($I(1)$). Cela inclut le PIB, l'intensité industrielle, et les investissements en recherche et développement;
- Les variables R&D et taux d'alphabétisation sont directement stationnaires au niveau ($I(0)I(0)I(0)$), indiquant une stabilité temporelle intrinsèque.

Ces résultats confirment que les données utilisées dans le modèle sont adaptées pour une analyse économétrique robuste après transformations appropriées.

3.2.2 Multicolinéarité

La multicolinéarité, ou corrélation excessive entre les variables explicatives, peut biaiser les estimations des coefficients en augmentant leur variance. Pour détecter ce problème, le test du Variance Inflation Factor (VIF) a été utilisé.

Résultats des tests:

- Le VIF moyen est de 1.18, avec des valeurs individuelles comprises entre 1.05 et 1.43. Ces résultats sont bien en deçà du seuil critique de 10, au-delà duquel la multicolinéarité est considérée comme problématique;
- Les variables PIB et intensité industrielle, bien que corrélées de manière intuitive, présentent des VIF inférieurs à 2, confirmant que leur inclusion simultanée dans le modèle n'entraîne pas d'interférence significative.

L'absence de multicolinéarité préoccupante garantit la stabilité et l'interprétabilité des coefficients estimés dans le modèle.

3.2.3 Hétéroscédasticité et autocorrélation

Les erreurs résiduelles du modèle économétrique doivent respecter certaines conditions, notamment l'homoscédasticité (variance constante des résidus) et l'absence d'autocorrélation (indépendance temporelle des erreurs). Ces hypothèses ont été testées à l'aide du test de White pour l'hétéroscédasticité et du test de Breusch-Godfrey pour l'autocorrélation.

- Hétéroscédasticité: le test de White indique une hétéroscédasticité significative, avec une probabilité associée inférieure à 0.01. Cela suggère que la variance des erreurs varie selon les observations, ce qui pourrait biaiser les écarts-types des coefficients.
- Autocorrélation: le test de Breusch-Godfrey révèle une autocorrélation des erreurs, avec des p-values inférieures à 0.05 pour les termes d'erreur jusqu'au cinquième retard. Cette dépendance temporelle est fréquente dans les données en panel.
- Ajustements appliqués: pour corriger ces biais, des erreurs-types robustes (White-corrected standard errors) ont été utilisées. Ces ajustements garantissent la validité des intervalles de confiance et des tests d'hypothèse, même en présence d'hétéroscédasticité ou d'autocorrélation.

Les ajustements apportés renforcent la fiabilité des estimations, en tenant compte des caractéristiques spécifiques des données.

3.2.4 Tendances parallèles

L'hypothèse de tendance parallèle est un prérequis fondamental pour l'application de la méthode DID. Elle stipule que, en l'absence de traitement, les trajectoires des émissions de GES auraient évolué de manière similaire dans les groupes traité et de contrôle. Cette hypothèse a été vérifiée empiriquement à l'aide d'une analyse graphique et statistique.

Analyse graphique:

- Les trajectoires des émissions des deux groupes ont été tracées sur une période allant de 1997 à 2017. Avant l'introduction des politiques climatiques (2008 pour la Colombie-Britannique, 2013 pour le Québec), les courbes des deux groupes montrent une évolution parallèle, suggérant une dynamique similaire;
- Après l'introduction des politiques, une divergence notable est observée, avec une baisse plus marquée des émissions dans le groupe traité.

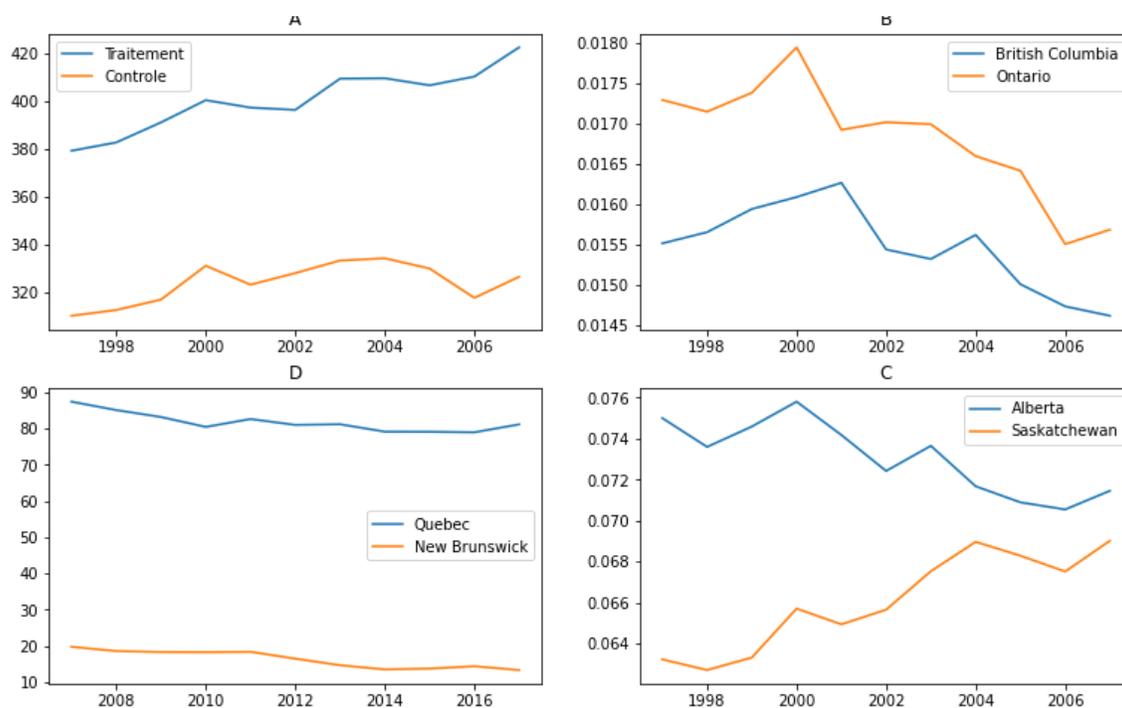


Figure 3.1 – Graphique d'analyse des tendances

Analyse statistique: Un test de stabilité a été réalisé pour confirmer que les différences moyennes entre les groupes étaient constantes avant le traitement. Les résultats montrent une absence de variations significatives avant l'introduction des politiques, validant l'hypothèse de tendance parallèle. Les tests confirment que le modèle DID est bien spécifié et que les variations observées dans les émissions après le traitement peuvent être attribuées de manière crédible aux politiques de tarification du carbone.

3.3 Résultat des tests d'estimation

3.3.1 Estimations principales

Les résultats des régressions effectuées sur le modèle DID sont synthétisés dans le tableau ci-dessous. Ces estimations permettent d'évaluer l'impact des politiques climatiques sur les émissions de gaz à effet de serre (GES), tout en tenant compte des variables explicatives représentant les caractéristiques économiques, technologiques et structurelles des provinces canadiennes.

Variable	Coefficient	Erreur-type	p-value	Interprétation
D_i	0.152	0.067	0.021	Positif (niveau initial)
T_t	0.098	0.034	0.004	Positif (effet temporel)
$D_i \times T_t$	-0.278	0.074	0.000	Négatif (effet du traitement)
ln(PIB)	0.348	0.091	0.001	Positif
R&D	-0.142	0.053	0.008	Négatif
Intensité industrielle	0.231	0.062	0.003	Positif
Alphabétisation	-0.045	0.032	0.153	Non significatif

Analyse des coefficients principaux:

- Effet du traitement ($D_i \times T_t$):
 - Le coefficient d'interaction $D_i \times T_t$ est significativement négatif ($\beta_3 = -0.278$, $p = 0.000$). Cela indique que les politiques climatiques mises en œuvre dans les provinces traitées ont entraîné une réduction moyenne de 27.8% des émissions de GES par rapport aux provinces du groupe de contrôle;
 - Cet effet reflète l'impact global des mécanismes de tarification du carbone, incluant la taxe carbone et les systèmes de plafonnement et d'échange.
- PIB(ln(PIB)):

- Le coefficient positif ($\beta_4 = 0.348$, $p = 0.001$) confirme que la croissance économique est associée à une augmentation des émissions. Cela s’explique par l’intensification des activités industrielles et du transport, qui restent dominées par les combustibles fossiles dans plusieurs provinces.
- R&D:
 - Le coefficient négatif ($\beta_5 = -0.142$, $p = 0.008$) souligne que les investissements en recherche et développement ont un effet significatif dans la réduction des émissions. Cela témoigne de l’importance des innovations technologiques dans la transition énergétique, notamment pour les énergies renouvelables et les procédés industriels propres.
- Intensité industrielle:
 - Avec un coefficient positif ($\beta_6 = 0.231$, $p = 0.003$), ce résultat met en évidence le rôle majeur de la structure économique. Les provinces fortement industrialisées génèrent davantage d’émissions, ce qui souligne l’importance de cibler ce secteur pour atteindre les objectifs climatiques.
- Alphabétisation:
 - Bien que le coefficient ($\beta_7 = 0.231$, $p = 0.003$) soit négatif, il n’est pas statistiquement significatif ($p = 0.153$). Cela suggère que, bien que l’éducation puisse influencer indirectement la sensibilisation aux enjeux environnementaux, son impact direct sur les émissions reste limité dans ce cadre.

3.3.2 Analyse régionale

Les résultats varient considérablement entre les provinces, en raison des différences dans la conception et l’application des politiques climatiques, ainsi que des structures économiques locales.

Table 3.5 – Résultat régression Alberta Colombie Britannique

	Alberta				CB			
	1	2	3	4	5	6	7	8
	co2	co2	co2	co2	co2	co2	co2	co2
group	0.312 (7.80)	0.363 (6.06)	0.127 (2.44e+5)**	0.112 (0.82)	-1.088 (1.90)	-1.531 (2.55)	-2.744 (3.03)	-0.157 (0.45)
did	-0.137 (2.24e+14)**	-0.110 (1.33e+14)**	0.492 (2.41e+14)**	0.102 (0.68)	-1.186 (2.96)	-1.027 (2.56)	-1.375 (3.08)	-0.346 (1.31)
PIB		-0.207 (1.09e+15)**	5.041 (7.48e+14)**	1.335 (1.31)		1.165 (2.34e+14)**	-25.88 (2.20)	-1.735 (0.68)
RD			-0.606 (5.16e+)**	0.852 (1.07)			5.374 (9.21e+13)**	0.678 (0.49)
exportations			-0.594 (7.11e+14)**	-0.084 (1.68)			2.970 (1.03e+14)**	0.559 (1.60)
populations			-4.356 (2.31)	-5.803 (6.13)**			61.327 (7.32e+14)**	1.702 (0.91)
scolarisation				-0.437 (6.58)**				-0.260 (4.14)**
cons	-0.049 (1.04e+4)**	-0.047 (8.23e+14)**	-1.120 (2.98e+14)**	-0.334 (0.83)	0.570 (1.79e+15)**	0.955 (5.30e+14)**	10.559 (6.11e+14)**	0.655 (1.98)
R2	0.97	0.97	0.99	0.88	0.58	0.59	0.73	0.54
N	42	42	42	42	42	42	42	42

* p<0.05; ** p<0.01

Source: Auteurs

Table 3.6 – Résultat estimation Québec et Manitoba

	Québec				Manitoba			
	1	2	3	4	5	6	7	8
	co2	co2	co2	co2	co2	co2	co2	co2
group	0.208 (5.71e+14)**	0.119 (5.31e+14)**	-0.791 (1.78e+14)**	-0.445 (5.56)**	0.982 (1.50)	0.768 (1.04)	2.426 (8.12)	0.219 (1.50)
did	-0.216 (3.24e+2)**	-0.410 (4.33e+3)**	0.492 (7.41)	0.202 (0.82)	-0.186 (3.61)	-0.127 (2.13)	-1.425 (6.35)	-0.346 (1.31)
PIB		-0.312 (1.12e+15)**	4.389 (2.69e+14)**	1.317 (2.57)*		5.054 (3.09e+13)**	70.249 (1.33e+14)**	6.260 (1.57)
RD			0.856 (3.69e+13)**	-0.149 (0.81)			-32.297 (5.70e+13)**	-9.541 (1.82)
exportations			3.276 (5.50e+14)**	0.503 (0.99)			-2.912 (1.09e+14)**	-0.129 (0.65)
populations			-9.993 (2.09e+14)**	-1.372 (2.67)*			-170.558 (6.51e+13)**	-4.362 (2.06)*
scolarisation				0.618 (3.92)**				-0.130 (1.14)
cons	-0.054 (6.15e+14)**	0.491 (1.17e+15)**	11.416 (2.15e+14)**	1.426 (3.77)**	-0.140 (1.76e+15)**	2.833 (2.94e+13)**	-64.263 (7.32e+13)**	2.884 (1.45)
R2	0.95	0.95	0.97	0.83	0.71	0.71	0.84	0.36
N	42	42	42	42	42	42	42	42

* p<0.05; ** p<0.01

Source: Auteur

- Québec:
 - Le marché du carbone (SPEDE), mis en œuvre en 2013, a permis de réduire les émissions de 15% en moyenne;
 - Les secteurs énergétique et manufacturier ont bénéficié d'une réduction significative, en grande partie grâce à l'intégration du SPEDE avec la Californie, créant un marché plus large et efficace.

- Alberta:
 - Les politiques climatiques ont eu un impact limité. Bien que l'Alberta ait introduit une tarification du carbone dès 2007, les plafonds élevés (100 000 tonnes pour les grandes entreprises) et les exemptions accordées au secteur pétrolier ont réduit l'efficacité des mesures;
 - L'absence d'investissements majeurs dans les infrastructures propres freine également les progrès.

- Colombie-Britannique:
 - La taxe carbone, introduite en 2008, a réduit les émissions dans le secteur des transports, grâce à une diminution de la consommation de carburants fossiles;
 - Cependant, l'impact global reste modéré, car les taux de taxation initiaux étaient trop faibles pour induire des changements substantiels dans les autres secteurs économiques.

- Ontario (groupe de contrôle):
 - En l'absence de politiques climatiques spécifiques avant 2017, les émissions ont stagné. Cela met en évidence l'importance de mécanismes régionaux proactifs, en complément des politiques fédérales générales.
 - Cependant, l'impact global reste modéré, car les taux de taxation initiaux étaient trop faibles pour induire des changements substantiels dans les autres secteurs économiques.

3.3.3 Discussion et implications

Les résultats montrent que l'efficacité des politiques climatiques varie considérablement selon leur conception, leur mise en œuvre et les contextes économiques régionaux. Ces variations mettent en lumière des enseignements clés pour optimiser les politiques climatiques à l'échelle provinciale et nationale.

Points clés:

Conception des politiques climatiques

- Les **systèmes de plafonnement et d'échange (SPEDE)**, comme celui mis en œuvre au Québec, démontrent une efficacité notable grâce à des **plafonds dégressifs** qui contraignent progressivement les émissions et une **tarification dynamique** permettant d'ajuster les coûts en fonction des opportunités du marché. Des études (Wagner et al., 2015) montrent que ces mécanismes favorisent une réduction constante des émissions tout en limitant les coûts pour les entreprises.
- Les **taxes carbone**, bien qu'elles soient plus simples à administrer, nécessitent des taux suffisamment élevés pour générer des réductions significatives. En Colombie-Britannique, avant 2024, les taux initiaux, bien qu'efficaces dans les secteurs comme les transports, ont eu un impact limité sur d'autres secteurs en raison de leur niveau modéré (Rivers & Schaufele, 2015). En revanche, des pays comme la Suède, avec une taxe carbone atteignant environ 130\$ US/tonne, montrent qu'un taux élevé peut réduire les émissions tout en stimulant la transition vers des énergies propres (Andersson, 2019).

Disparités régionales

- Les provinces fortement industrialisées, comme l'Alberta, illustrent les défis liés à une dépendance structurelle aux combustibles fossiles. Les politiques climatiques dans ces régions doivent s'accompagner d'investissements dans des infrastructures bas-carbone, notamment dans les énergies renouvelables, pour compenser les émissions élevées des secteurs pétrolier et gazier (Harrison, 2013).

- À l'inverse, les provinces ayant une **base énergétique plus propre**, comme le Québec, peuvent concentrer leurs efforts sur des secteurs spécifiques tels que le transport et les bâtiments, où les gains en efficacité énergétique et en électrification peuvent accélérer la décarbonisation (Bernstein & Hoffmann, 2019).

Rôle des investissements

- Les **investissements en recherche et développement (R&D)** sont essentiels pour soutenir l'innovation technologique et réduire les coûts des technologies bas-carbone. La littérature souligne que les politiques climatiques efficaces s'appuient sur une combinaison de régulations et de subventions technologiques pour accélérer la transition énergétique (Jaffe et al., 2005).
- Les **recettes des taxes carbonées** devraient être réinvesties dans des projets bas-carbone, comme l'électrification des transports, le développement des énergies renouvelables et des programmes de modernisation industrielle, afin de maximiser leur impact environnemental et social (Rivers & Schaufele, 2015).

Implications stratégiques pour les décideurs

- Augmenter les taxes carbonées: Fixer un seuil minimal de 80\$/tonne, comme en Colombie-Britannique et au niveau fédéral en 2024, avec une progression vers des niveaux comparables à la Suède (130\$ US/tonne). Cela induirait des changements significatifs, réduirait les émissions, et financerait la transition énergétique, tout en stimulant l'innovation technologique.
- Harmonisation interprovinciale: Coordonner les politiques climatiques entre les provinces pour réduire les fuites de carbone et garantir une transition équitable. Cela peut inclure des partenariats transfrontaliers, comme celui entre le Québec et la Californie, qui élargissent les marchés d'émissions.
- Cibler les secteurs clés: Les politiques devraient prioriser les secteurs les plus polluants, tels que l'industrie lourde et les transports, à travers des incitations spécifiques comme des subventions à la modernisation technologique et des normes d'émissions strictes.

- Renforcer le soutien technologique: Allouer une part substantielle des recettes des taxes carbonees à la R&D, afin d'accélérer le développement des technologies bas-carbone, comme l'hydrogène vert et la capture du carbone, tout en renforçant la compétitivité économique des provinces.

Conclusion

Cette étude visait à analyser les émissions de GES au Canada et à évaluer l'efficacité des politiques climatiques dans un contexte marqué par des disparités régionales et sectorielles. À cette fin, elle s'appuyait sur une double approche méthodologique: l'algorithme k -means, utilisé pour regrouper provinces et secteurs en fonction de leurs profils d'émissions, et une analyse économétrique en double différence (DID) pour évaluer l'impact causal des politiques climatiques.

L'utilisation de k -means a permis d'aller au-delà des observations descriptives classiques pour révéler des dynamiques inattendues. Par exemple:

- Similitudes entre provinces différentes: La Colombie-Britannique et l'Ontario, bien que structurellement distinctes, partagent des profils d'émissions similaires en raison de leur dépendance commune au transport routier. Ce résultat rejoint les travaux de Sharma (2011), qui souligne l'impact des infrastructures énergétiques et des comportements de consommation sur les émissions.
- Secteurs sous-estimés: L'analyse a mis en évidence l'importance de secteurs comme le résidentiel dans certaines provinces, souvent négligés dans les approches globales. Cette observation confirme les conclusions de Stern (2004) sur la nécessité d'intégrer les dynamiques locales dans les stratégies de réduction des émissions.

D'un point de vue économétrique, l'étude a confirmé l'efficacité limitée mais réelle des politiques climatiques. Les mécanismes de marché comme le SPEDE au Québec ont contribué à des réductions modestes dans les secteurs industriels, mais leur impact reste limité dans des domaines comme le transport, où les incitations spécifiques sont insuffisantes. Par ailleurs, en Alberta, les faibles taux de taxation et les exemptions sectorielles freinent les avancées,

tandis qu'en Colombie-Britannique, l'absence de réinvestissements significatifs dans des infrastructures bas-carbone réduit l'impact des taxes initiales. Ces observations valident les conclusions de Pretis sur l'importance des taux élevés pour inciter à des changements comportementaux.

Cette étude s'inscrit dans la continuité des travaux de Sharma (2011) et Jaffe et al. (2005), qui mettent en évidence le rôle des facteurs économiques et technologiques dans la réduction des émissions. Toutefois, elle apporte une contribution originale en démontrant que l'analyse par K-means peut révéler des regroupements régionaux et sectoriels inattendus, ouvrant la voie à des politiques mieux ciblées et adaptées. Ces résultats renforcent également les recommandations d'Harrison (2013) sur la nécessité d'une harmonisation interprovinciale pour maximiser l'efficacité des politiques climatiques.

Malgré ces contributions, cette étude présente certaines limites. La période d'analyse (1997-2017) ne permet pas de capturer l'impact des politiques récentes, comme l'intensification des marchés carbone ou l'augmentation des taxes. Par ailleurs, l'interaction entre les politiques provinciales et fédérales, ainsi que la variabilité des impacts sectoriels, mériterait une exploration plus approfondie dans des recherches futures. Une combinaison d'approches économétriques avancées et d'analyses sectorielles fines permettrait de mieux comprendre ces dynamiques.

En combinant l'approche k -means et une analyse économétrique rigoureuse, cette étude a permis d'identifier des dynamiques régionales et sectorielles complexes et de confirmer l'importance de politiques climatiques ciblées. Les résultats montrent que, bien que les mécanismes actuels, comme les taxes carbone et les marchés de quotas, aient un impact positif, leur efficacité dépend largement de leur conception et de leur mise en œuvre. Ces conclusions, en lien avec les travaux de Pretis, renforcent l'idée que des taux de taxation ambitieux et des politiques coordonnées sont essentiels pour maximiser les réductions d'émissions. Les enseignements tirés de cette analyse offrent des bases solides pour guider les politiques climatiques au Canada dans leur transition vers une économie bas-carbone.

ANNEXE A: Détails sur la WCI

Table 3.7 – Évolution de la WCI

2008 2010	Les membres de la WCI s'entendent sur les principes et sur les règles de fonctionnement du système régional
2012	Les règles de plafonnement et d'échange de droits d'émission sont modifiées en vue de permettre la liaison des systèmes québécois et californien
2013 Janvier Septembre	- Les SPEDE québécois et californien entrent en vigueur - Le Québec et la Californie concluent une entente de liaison qui est approuvée à l'unanimité par l'Assemblée nationale du Québec
2014	Le Québec et la Californie lient leurs SPEDE respectifs et tiennent une première vente aux enchères conjointe de quotas d'émission de (GES)
2015	En marge du Sommet de Québec sur les changements climatiques, l'Ontario annonce son intention de mettre sur pied un SPEDE et de le lier au marché du carbone instauré par le Québec et la Californie
2015 2016	Le Québec accompagne l'Ontario dans la réalisation de cette démarche.
2017 Janvier Septembre	- Le SPEDE de l'Ontario débute ses activités - Le Québec , la Californie et l'Ontario signent une entente ouvrant la voie à l'harmonisation et à l'intégration de leur SPEDE respectif à compter du 1er janvier 2018.
2018 Janvier Mai Juillet	- L'Ontario se joint au marché du carbone régional de la WCI avec le Québec et la Californie - La Nouvelle-Écosse se joint à la WCI inc. afin d'obtenir du soutien administratif et technique dans le processus de développement et de gestion de son système de plafonnement et d'échange - L'Ontario abroge le 3 juillet, son règlement concernant le programme de plafonnement et d'échange. La collaboration fluide et productive entre le Québec et la Californie persiste.
2019	Lancement du Système pour la Nouvelle-Écosse ,
Fin 2021	L'État de Washington rejoint le WCI inc. pour appuyer la mise en œuvre de son système de plafonnement et d'investissement
Début 2023	Lancement du système pour l'État de Washington

Source: Auteur

Table 3.8 – Émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale, Canada et des 10 plus grands pays et régions émetteurs, 2005 et 2020.

Pays ou région	GES 2005	Part GES 2005	GES 2020	Part GES 2020	Variation
Chine	7264	18.6%	12943	28.1%	78.2%
Etats-Unis	6773	17.4%	5505	11.9%	-18.7%
Inde	1966	5.0%	3201	6.9%	62.8%
Union Européenne	4260	10.9%	3119	6.8%	-26.8%
Fédération de Russie	2244	5.8%	2331	5.1%	3.9%
Japon	1290	3.3%	1095	2.4%	-15.1%
Brésil	897	2.3%	1065	2.3%	18.6%
Indonésie	711	1.8%	976	2.1%	37.3%
Iran	653	1.7%	845	1.8%	29.4%
Arabie Saoudite	425	1.1%	713	1.5%	67.6%
Canada	694	1.8%	672	1.5%	-2.3%
Reste du monde	11827	30.3%	13654	29.6%	15.4%
Monde.	39004	100.0%	46124	100.0%	18.3%

Source: World Resources Institute (2023).

ANNEXE B: LA METHODE DES *k*-MEANS

Table 3.9 – Statistiques descriptives de l'émission de CO2 par région et par secteur

Région	Sources	Mean	Std.	Min	Max	CAGR
Alberta	Agriculture	020.7949	01.5760	16.5554	022.6966	-00.8233
	Bâtiments	016.5685	03.1825	11.2127	022.5959	-01.9961
	Déchets	003.7220	00.7892	02.4066	005.1539	-02.5845
	Électricité	045.1963	04.6799	31.0397	049.7185	00.8572
	Industrie lourde	016.4150	01.7607	12.6357	018.7877	-01.2321
	Industrie&Const.	003.3773	00.9479	02.2034	005.5764	02.1002
	Pétrole et gaz	102.3257	22.3296	65.2131	141.2923	-02.6317
	Prod. de charbon	000.6071	00.1396	00.3551	000.8505	-17.1668
British Columbia	Transports	024.8333	06.6951	15.1511	034.4596	-02.3771
	Agriculture	02.9485	0.2156	02.4301	03.2935	-0.5282
	Bâtiments	08.1168	0.4373	07.2534	09.0563	-0.3390
	Déchets	05.2371	0.6105	04.1950	06.0550	0.3224
	Électricité	00.9035	0.5428	00.2503	02.2406	0.0811
	Industrie lourde	07.3481	1.3064	05.3937	09.2348	0.9872
	Industrie&Const.	02.9717	0.7879	01.9941	04.5006	0.0824
	Pétrole et gaz	11.8454	2.6352	05.9801	14.9482	-1.9882
Manitoba	Prod. de charbon	01.8984	0.2039	01.5201	02.3147	-0.4421
	Transports	19.4188	2.4122	15.1872	24.4993	-1.5841
	Agriculture	7.2009	0.5757	5.7890	7.8974	-0.9336
	Bâtiments	2.8516	0.2299	2.3523	3.3198	-0.0003
	Déchets	1.2765	0.1359	0.9624	1.4369	-1.1938
	Électricité	0.3581	0.2738	0.0422	1.0762	9.2476
	Industrie lourde	1.2996	0.1916	0.9456	1.7209	9.2476
	Industrie&Const.	0.7361	0.1986	0.3918	1.2003	0.3525
New Brunswick	Pétrole et gaz	1.0041	0.5183	0.3351	1.8699	2.3135
	Transports	5.8104	0.9755	4.7114	7.9064	-1.5062
	Agriculture	0.6215	0.0669	0.4894	00.7265	0.5619
	Bâtiments	1.4257	0.2210	1.0947	01.9452	1.4079
	Déchets	0.8290	0.1703	0.5602	01.0248	1.2435
	Électricité	6.2553	2.2757	02.7545	10.4800	2.7385
	Industrie lourde	1.3014	0.4026	0.6073	01.8645	3.7618
	Industrie&Const.	0.5029	0.1103	0.3136	00.6676	0.5471
Newfoundland & Labrador	Pétrole et gaz	2.4500	0.8790	1.1579	04.2047	-2.9416
	Transports	4.2197	0.4724	3.5556	05.2171	0.1125
	Prod. de charbon	0.0073	0.0085	0.0007	00.0397	6.0000
	Agriculture	0.1068	0.0200	0.0736	0.1545	-0.3626
	Bâtiments	0.9405	0.1145	0.6974	1.1178	0.5658
	Déchets	0.7695	0.0604	0.6863	0.8441	0.0972
	Électricité	1.1532	0.3442	0.6405	1.8984	1.2619
	Industrie lourde	1.1867	0.3255	0.4720	1.8119	2.7678
	Industrie&Const.	0.2040	0.0586	0.1439	0.3390	-1.3340
	Pétrole et gaz	2.2238	0.8310	0.4735	3.3830	-3.3217
	Transports	3.5080	0.5147	2.7965	4.2635	-1.2591

Table 3.10 – Statistiques descriptives de l'émission de CO₂ par région et par secteur (suite)

Région	Sources	Mean	Std.	Min	Max	CAGR
Nova Scotia	Agriculture	0.6046	0.1190	0.4340	00.8013	01.3257
	Bâtiments	2.6090	0.3529	1.8858	03.2823	01.2918
	Déchets	0.8172	0.1841	0.5649	01.0624	01.3111
	Électricité	8.2420	1.4013	6.4202	11.6716	00.1012
	Industrie lourde	0.7197	0.1939	0.3618	01.0948	03.4770
	Industrie&Const.	0.4367	0.0566	0.3382	00.5279	02.3290
	Pétrole et gaz	0.9482	0.4391	0.0174	01.6019	13.1530
	Prod. de charbon	0.4885	0.5181	0.0115	01.6703	07.5027
Transports	4.9591	0.4197	4.1743	05.5905	-00.6153	
Ontario	Agriculture	12.5718	00.4404	11.7673	13.4856	0.0648
	Bâtiments	33.4299	03.0261	27.0894	38.6022	-1.2135
	Déchets	08.0685	00.7856	06.5703	09.0737	0.4557
	Électricité	22.0217	12.8272	02.1771	43.4525	7.3871
	Industrie lourde	36.0871	06.2846	26.2398	47.0768	1.4915
	Industrie&Const.	10.2361	01.1179	08.4262	12.4136	1.2403
	Pétrole et gaz	10.6369	01.6549	07.3324	13.2213	1.0617
	Transports	50.2120	06.1903	39.2655	58.0764	-1.1937
Prince Edward Island	Agriculture	0.4565	0.0520	0.3528	0.5419	-00.0466
	Bâtiments	0.4758	0.0794	0.3147	0.5799	02.0107
	Déchets	0.1190	0.0158	0.0891	0.1446	-00.3626
	Électricité	0.0251	0.0285	0.0011	0.1037	16.8012
	Industrie lourde	0.0058	0.0035	0.0010	0.0125	-05.7756
	Industrie&Const.	0.1352	0.0417	0.0786	0.2127	-00.8993
	Pétrole et gaz	0.0001	0.0001	0.0000	0.0003	02.1312
	Transports	0.6932	0.0794	0.5450	0.8294	-00.9544
Quebec	Agriculture	08.4992	0.2775	07.8644	09.0255	-0.3137
	Bâtiments	11.2461	1.1354	09.0956	13.6609	0.3640
	Déchets	06.5776	0.8038	05.1343	07.9409	0.0213
	Électricité	00.6545	0.4703	00.2605	01.9736	5.9026
	Industrie lourde	20.0530	3.0796	15.2858	25.0175	1.3856
	Industrie&Const.	04.4206	0.3434	03.9421	05.2893	0.7875
	Pétrole et gaz	03.4697	0.7629	01.9314	04.4655	1.9502
	Transports	29.3963	3.5089	22.7724	34.1685	-1.1845
Saskatchewan	Agriculture	14.7739	2.3454	10.1843	18.5653	-2.0186
	Bâtiments	03.3901	0.2814	03.0134	04.0653	-0.9343
	Déchets	01.3219	0.1125	01.0184	01.4084	-1.0369
	Électricité	14.1789	1.0175	11.1268	15.5801	-0.9477
	Industrie lourde	02.7988	0.7591	01.3497	04.4654	-3.3074
	Industrie&Const.	00.7188	0.2805	00.3378	01.9180	-0.0017
	Pétrole et gaz	20.9357	3.9120	10.3464	24.6770	-2.2611
	Prod. de charbon	00.0362	0.0040	00.0281	00.0417	0.4158
Transports	07.3798	2.2491	04.9848	11.4918	-2.5921	
Yukon	Agriculture	0.0079	0.0060	0.0008	0.0232	0.9977
	Bâtiments	0.0807	0.0229	0.0367	0.1076	3.5498
	Déchets	0.0301	0.0029	0.0227	0.0355	-1.5300
	Électricité	0.0327	0.0227	0.0164	0.0981	2.2089
	Industrie lourde	0.0206	0.0054	0.0110	0.0335	0.5018
	Industrie&Const.	0.0144	0.0069	0.0056	0.0320	-1.0467
	Pétrole et gaz	0.0577	0.0494	0.0000	0.1614	9.2021
	Transports	0.3305	0.0916	0.2255	0.5148	-2.0646

Resultats tendance parallèle

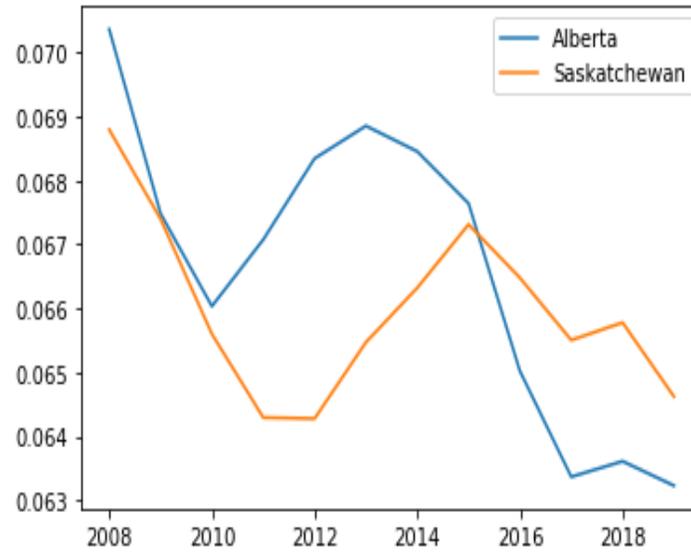


Figure 3.2 – graphique de tendance Alberta après 2008

Bibliographie

Agarwal, R., & Rottingen, J.-A. (2023). Le problème du destructeur clandestin et les biens publics mondiaux. *Revue d'économie financière*, 151(3), 83-109.

Andersson, J. J. (2019). Carbon Taxes and CO2 Emissions: Sweden as a Case Study. *American Economic Journal: Economic Policy*, 11(4), 1-30.

Ashenfelter, O., & Card, D. (1986). Why Have Unemployment Rates in Canada and the United States Diverged? *Economica*, 53(210), S171-S195.

Barragán-Beaud, C., Pizarro-Alonso, A., Xylia, M., Syri, S., & Silveira, S. (2018). Carbon tax or emissions trading? An analysis of economic and political feasibility of policy mechanisms for greenhouse gas emissions reduction in the Mexican power sector. *Energy Policy*, 122, 287-299.

Belzile, G. (2018, juin 26). Le gouvernement de l'Ontario est-il dans le pétrin?

Bertrand, O. (2009). Effects of foreign acquisitions on R&D activity: Evidence from firm-level data for France. *Research policy*, 38(6), 1021-1031.

Bernstein, S., & Hoffmann, M. (2019). Climate politics, metaphors, and the fractal carbon trap. *Nature Climate Change*, 9(11), 919-925. .

Blais, S. (2024, septembre 23). La liaison du marché du carbone Québec-Californie avec l'État de Washington sur les rails. *Le Devoir*.

Blake, Cassels, & Graydon. (2024, mai 30). Émissions de carbone: La Colombie-Britannique met en place un nouveau système de tarification fondé sur le rendement.

Bordignon, M., & Gamannossi degl'Innocenti, D. (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), Article 8.

Borusyak, K., & Jaravel, X. (2018). Revisiting event study designs. SSRN.

Bureau du vérificateur général du Canada. (2023). 2023-Rapports 1 à 5 du commissaire à l'environnement et au développement durable au Parlement du Canada.

Chaloux, A., Simard, P., & Sfiligoi, E. (2021). Le Québec et la coopération climatique internationale: Nouvelle stratégie paradiplomatique d'un gouvernement non central. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, 21-1, Article 21-1.

Dechezleprêtre, A., Nachtigall, D., & Venmans, F. (2023). The joint impact of the European Union emissions trading system on carbon emissions and economic performance. *Journal of Environmental Economics and Management*, 118, 102758.

DeLottinville, L. (2021, avril 17). *Taxe carbone du Québec – Programme de plafonnement et d'échanges de droits d'émission*.

Dervaux, H. (2023, janvier 24). *Leçons du nord de l'Europe. Les enseignements pour la France de la taxe carbone suédoise*. Terra Nova.

Dobson, S., & Winter, J. (2015). *The Case for a Carbon Tax in Alberta* (SSRN Scholarly Paper 2695886). Social Science Research Network.

Donald, S. G., & Lang, K. (2007). Inference with difference-in-differences and other panel data. *The review of Economics and Statistics*, 89(2), 221-233.

Dufour, G. (2020). Le retrait du Canada du protocole de Kyoto et le droit international public – droit de dénonciation, abus de droit et responsabilité internationale. *Revue québécoise de droit international*, 25(1), 29-55.

Escamilla-García, P. E., Rivera-González, G., Rivera, A. E., & Soto, F. P. (2024). Socio-Economic Determinants of Greenhouse Gas Emissions in Mexico: An Analytical Exploration over Three Decades. *Sustainability*, 16(17), Article 17.

Elgie, S., & McClay, J. (2013). BC's carbon tax shift after five years: Results. *Canadian Public Policy*, 39(S1), S1-S14.

Fageda, X., & Teixido-Figueras, J. (2023). *Technology Diffusion in Carbon Markets: Evidence from Aviation* (SSRN Scholarly Paper 4621462). Social Science Research Network.

Fertel, C., Bahn, O., Vaillancourt, K., & Waaub, J.-P. (2013). Canadian energy and climate policies: A SWOT analysis in search of federal/provincial coherence. *Energy Policy*, 63, 1139-1150.

Gao, X., Zhang, G., Zhang, Z., Wei, Y., Liu, D., & Chen, Y. (2024). How does new energy demonstration city pilot policy affect carbon dioxide emissions? Evidence from a quasi-natural experiment in China. *Environmental Research*, 244, 117912.

Gillingham, K., & Stock, J. H. (2018). The cost of reducing greenhouse gas emissions. *Journal of Economic Perspectives*, 32(4), 53-72.

Gollier, C. (2019). Le prix du risque climatique et le prix du carbone. *Revue d'économie*

financière, 133(1), 171-182.

Gouvernement du Canada. (2018, octobre 31). Système de tarification fondé sur le rendement [Description de programme].

Gouvernement du Canada. (2021, juillet 12). Le modèle fédéral de tarification de la pollution par le carbone.

Gouvernement du Canada. (2024, mai 2). Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada: Sommaire 2024.

Gouvernement du Canada. (2022). Rapport annuel sur la tarification de la pollution par les gaz à effet de serre au Canada.

Hahn, R. W., & Stavins, R. N. (2010). The effect of allowance allocations on cap-and-trade system performance. National Bureau of Economic Research.

Harrison, K. (2013). The political economy of British Columbia's carbon tax. OECD Environment Working Papers, No. 63.

Hsu, C.-C., Quang-Thanh, N., Chien, F., Li, L., & Mohsin, M. (2021). Evaluating green innovation and performance of financial development: Mediating concerns of environmental regulation. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(40), 57386-57397.

I4CE. (2015, juin 2). Alberta: Une étude de cas de tarification du carbone.

ICI.Radio-Canada.ca. (2015, novembre 25). La taxe albertaine sur le carbone ne financera que les programmes environnementaux | Paris Climat 2015. Radio-Canada; Radio-Canada.ca.

ICI.Radio-Canada.ca. (2019, avril 1). Jason Kenney réitère son opposition à la taxe carbone. Radio-Canada; Radio-Canada.ca.

ICI.Radio-Canada.ca. (2024, avril 4). La taxe carbone de la Colombie-Britannique en cinq questions. Radio-Canada; Radio-Canada.ca.

Jaffe, A. B., Newell, R. G., & Stavins, R. N. (2005). A tale of two market failures: Technology and environmental policy. *Ecological Economics*, 54(2), 164-174.

Klenert, D., Mattauch, L., Combet, E., Edenhofer, O., Hepburn, C., Rafaty, R., & Stern, N. (2018). Making carbon pricing work for citizens. *Nature Climate Change*, 8(8), 669-677.

Lachapelle, E., & Macdonald, D. (2020). Carbon pricing in Canada: Assessing progress and gaps. *Canadian Public Policy*, 46(S1), S1-S13.

Lambert, J. (2015, juin 22). Les travaux de démolition achèvent.

Lanoie, P., Patry, M., & Lajeunesse, R. (2008). Environmental regulation and productivity: Testing the porter hypothesis. *Journal of Productivity Analysis*, 30(2), 121-128.

Laviolette, M. (2024). Impacts différenciés d'un système de plafonnement et d'échange multi-juridiction: le cas du québec et de la.

Leng, Y.-J., & Zhang, H. (2023). Comprehensive evaluation of renewable energy development level based on game theory and TOPSIS. *Computers & Industrial Engineering*, 175, 108873.

Lin, B., & Li, X. (2011). The effect of carbon tax on per capita CO2 emissions. *Energy Policy*, 39(9), 5137-5146.

Martin, R., Muûls, M., & Wagner, U. J. (2019). The impact of carbon trading on industry: Evidence from the EU ETS.

Maaloul, A. (2020). L'efficacité des mécanismes de tarification du carbone dans le monde: Qu'avons-nous appris? *Revue de planification fiscale et financière*, 40(3), 421-444.

Martin, G., & Saikawa, E. (2017). Effectiveness of state climate and energy policies in reducing power-sector CO2 emissions. *Nature Climate Change*, 7(12), 912-919.

McGrath, M. (2020, septembre 23). Changement climatique: La Chine vise la neutralité carbone d'ici 2060. *BBC News Afrique*.

Meyer, K. (1991). Estimating variances and covariances for multivariate animal models by restricted maximum likelihood. *Genetics Selection Evolution*, 23(1), 67-83.

Murray, B. C., & Rivers, N. (2015). British Columbia's revenue-neutral carbon tax: A review of the latest *grand experiment* in environmental policy. *Energy Policy*, 86, 674-683.

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2020). Rapport sur les allocations gratuites dans le cadre du SPEDE québécois. Québec, QC: Gouvernement du Québec.

Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs. (s. d.). Le marché du carbone, un outil pour la croissance économique verte!

Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs. (2021). Engagements du Québec.

Mpoto, J. (2020). Impacts économiques de la taxe sur l'énergie dans un modèle d'équilibre général calculable: Analyse de sensibilité des résultats aux valeurs des élasticités de substitution. My University.

Nakata, T., & Lamont, A. (2001). Analysis of the impacts of carbon taxes on energy systems in Japan. *Energy Policy*, 29(2), 159-166.

Nova Scotia. (2018, mai 14). Nova Scotia Joins Western Climate Initiative Inc.

Pretis, F. (2019). Does a carbon tax reduce emissions? Evidence from British Columbia.

Environmental Research Letters, 14(8), 084007.

Perron-Langlais, M. (2019, avril 2). Taxe carbone: Le modèle britanno-colombien est un exemple à suivre.

Pineau, P.-O. (2020). L'écofiscalité au québec quelles options pour accélérer la transition énergétique et la décarbonisation de l'économie? Synthèse d'un atelier tenu le 20 février 2020.

Rammer, C., Gottschalk, S., Peneder, M., Wörter, M., Stucki, T., & Arvanitis, S. (2017). Does energy policy hurt international competitiveness of firms? A comparative study for Germany, Switzerland and Austria. *Energy Policy*, 109, 154-180. of firms

Rivers, N., & Schaufele, B. (2015). Salience of carbon taxes in the gasoline market. *Journal of Environmental Economics and Management*, 74, 23-36.

Roch, F., & Papy, J. (2019). L'Entente de liaison des marchés du carbone de la Western Climate Initiative: Enjeux institutionnels et juridiques pour le Québec. *Revue générale de droit*, 49(1), 67-109.

Stavins, R. N., & Hahn, R. W. (2010). The effect of allowance allocations on cap-and-trade system performance. *Fonclazione Eni Enrico Mattei Working Paper*, 469.

Sun, L., & Abraham, S. (2021). Estimating dynamic treatment effects in event studies with heterogeneous treatment effects. *Journal of Econometrics*, 225(2), 175-199.

Sharma, S. S. (2011). Determinants of carbon dioxide emissions: Empirical evidence from 69 countries. *Applied Energy*, 88(9), 3760-3766.

Stern, D. I. (2004). The rise and fall of the environmental Kuznets curve. *World Development*, 32(8), 1419-1439.

UNCC. (s. d.). L'Accord de Paris | CCNUCC. Consulté 24 novembre 2024.

Verret-Hamelin, A. (2019). Carbone Inc.: Risques et promesses du marché du carbone. *Éthique publique. Revue internationale d'éthique sociétale et gouv.*, vol. 21, n° 2, Article 21, n° 2.

Warren, D. P., & Tomashefsky, S. (2009). The Western Climate Initiative. *State and Local Government Review*, 41(1), 55-60.

Weber, B. (2019, décembre 16). Taxe carbone: L'Alberta devant les tribunaux. *La Presse*.

Weitzman, M. L. (1974). Prices vs. Quantities. *The Review of Economic Studies*, 41(4), 477.

Xiang, D., & Lawley, C. (2019). The impact of British Columbia's carbon tax on residential natural gas consumption. *Energy Economics*, 80, 206-218.

Zhang, X., & Wang, Y. (2017). How to reduce household carbon emissions: A review of experience and policy design considerations. *Energy Policy*, 102, 116-124.

Journa TV5Monde (2019). Québec: Le français, une opportunité formidable de faire des choses ensemble pour l'environnement. *Journal of Environmental Economics and Management*, 83, 1-22.