

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

IMPACTS DIFFÉRENCIÉS D'UN SYSTÈME DE PLAFONNEMENT ET
D'ÉCHANGE MULTI-JURIDICTION : LE CAS DU QUÉBEC ET DE LA
CALIFORNIE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN ÉCONOMIQUE

PAR

MAËVA LAVIOLETTE

MARS 2024

Remerciements

Je tiens premièrement à remercier mon directeur de mémoire M.Charles Séguin, pour son temps, son soutien mais également pour sa patience tout au long de ce projet de mémoire.

Je souhaite aussi remercier les différents professeurs du Département des sciences économiques qui m'ont permis d'acquérir les connaissances nécessaires à la réalisation de ce projet.

Enfin, mes remerciements vont également à mes parents et à mes différents camarades, plus particulièrement à P. Carmel Marie Zagré et Franck Atsiga qui m'ont soutenu tout au long de l'écriture de ce mémoire, mais également pour leurs conseils judicieux.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	iv
LISTE DES FIGURES	v
RÉSUMÉ	vi
INTRODUCTION	1
1 Revue de littérature	5
2 Fonctionnement du marché du carbone Québec-Californie et données	9
2.1 Fonctionnement du marché du carbone Québec-Californie . .	9
2.2 Données	11
3 Modélisation	20
3.1 Modèle	20
3.2 Calibration	24
4 Analyses et résultats	29
4.1 Analyse théorique	29
4.2 Analyse empirique	37
4.3 Résultats	41
CONCLUSION	48
5 Annexe	50
5.1 Tableaux	50
5.2 Démonstrations mathématiques	53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
1	Paramètres	28
2	Émissions des secteurs non couverts	46
3	Plafonds des permis pour le Québec et la Californie	50
4	Synthèse de l'analyse théorique	51
5	Plafonds communs, permis, crédits compensatoires rapportés et estimés	52

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1	Évolution des émissions de GES du Québec de 1990 à 2020 (ECCC)	2
2	Évolution des permis rendus disponibles par rapport au plafond d'émissions entre 2013 et 2020	14
3	Évolution du nombre de permis remis par les firmes par rapport au plafond	15
4	Variation en pourcentage des émissions des secteurs en 2020 par rapport à 2013	18
5	Flux net annuels de droits d'émission	19
6	Bénéfices agrégés pour le Québec et la Californie	28
7	Évolution des plafonds et des permis épargnés de 2013 à 2030	37
8	Évolution des plafonds et des permis épargnés de 2013 à 2030 sous un scénario pessimiste	39
9	Évolution des émissions en prenant en compte les flux de permis et les crédits compensatoires forestiers entre 2010 et 2030	43
10	Évolution des objectifs conjoints au cours des années	43
11	Évolution des plafonds, des permis épargnés et des crédits compensatoires de 2013 à 2030	45
12	Évolution des plafonds et des permis épargnés de 2013 à 2030 sans crédits compensatoires	47

RÉSUMÉ

Les cibles que le Québec s'est fixées en matière de réduction de gaz à effet de serre (GES) ne semblent pas avoir été atteintes. Par le biais du système de plafonnement et d'échange de droits d'émissions (SPEDE) que la province partage avec la Californie, nous nous intéressons au rôle que jouent les flux d'échanges de permis et les crédits compensatoires étrangers, tous deux non comptabilisés par Environnement et Changement Climatique Canada (ECCC), dans l'atteinte des cibles fixées par le Québec. Pour ce faire, nous utilisons un modèle intertemporel d'échange des émissions en considérant la possibilité pour les firmes d'épargner et d'obtenir des permis compensatoires. Selon nos résultats, en ne prenant pas en compte les échanges de permis et les crédits compensatoires étrangers ECCC sous-estime les réductions qui ont été réellement réalisées par les firmes québécoises.

INTRODUCTION

Les changements climatiques sont aujourd’hui au cœur de nombreux débats. Les catastrophes auxquelles nous assistons et les recommandations des rapports du GIEC IPCC (2022) sont à l’origine de manifestations populaires récurrentes. Ces dernières mènent non seulement la population mondiale à prendre des actions à l’échelle individuelle, mais poussent également les gouvernements à prendre des mesures et à organiser des sommets internationaux.

Dans le cadre du Protocole de Kyoto, de nombreux gouvernements se sont engagés à réduire leurs émissions de gaz à effets de serre (GES) en deçà du niveau des émissions de 1990. C’est notamment le cas du Québec. La Belle Province s’est fixé pour plusieurs années des cibles de réduction des GES, avec pour objectif final la carboneutralité en 2050 (MELCCFP, 2022). Pour ce faire, l’outil principal utilisé par la province est un système de plafonnement et d’échanges des émissions de gaz à effet de serre (SPEDE). Ce système de plafonnement et d’échange est partagé avec la Californie, avec qui des permis sont échangés. Cependant, malgré les mesures mises en place, selon les émissions rapportées par Environnement et Changement Climatique Canada (ECCC, 2022) l’objectif fixé par la province pour l’année 2020 n’a pas été atteint.

En effet, l’objectif fixé par le Québec pour 2020 était de réduire les émissions de GES de 20% par rapport à 1990. La figure 1 représente l’évolution des émissions de GES exprimés en millions de tonnes métriques d’équivalent CO_2 , de 1990 à 2020. Comme nous pouvons le voir dans ce graphique, les émissions de GES en 2020 ont diminué d’environ 10% par rapport à 1990. La cible fixée pour 2020

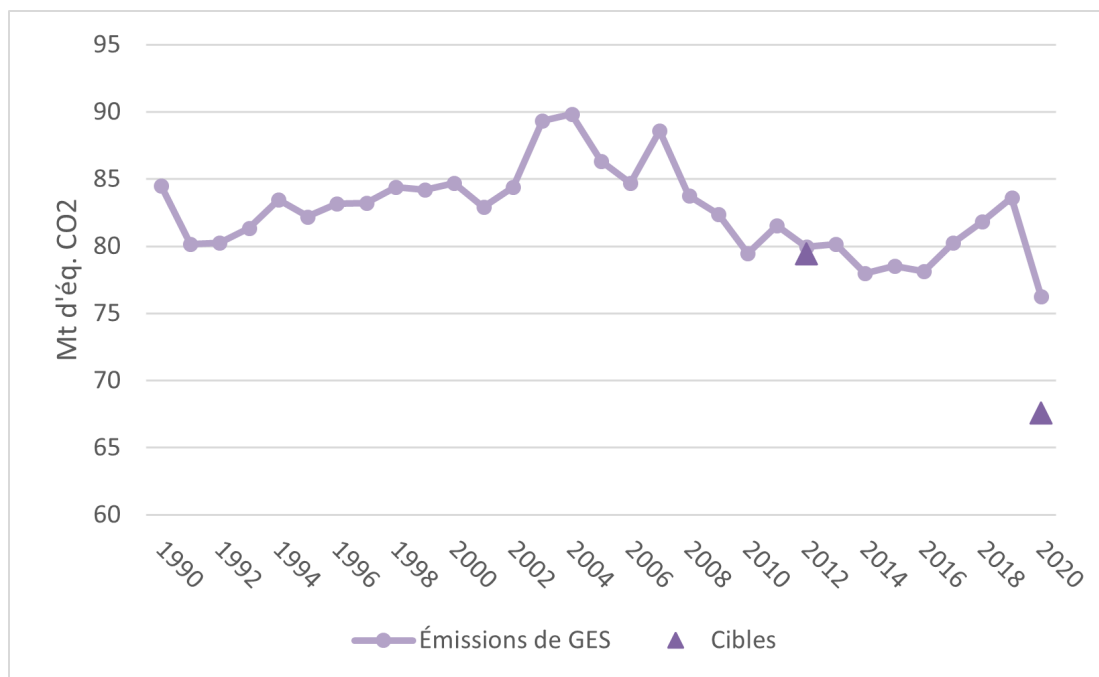


FIGURE 1 Évolution des émissions de GES du Québec de 1990 à 2020 (ECCC)

n'ayant pas été atteinte, cela met donc en doute l'atteinte de celle de 2030, qui est la réduction des émissions de 37,5% par rapport à 1990.

De façon non exhaustive, parmi les raisons qui pourraient expliquer l'échec de la province quant à l'atteinte de ses objectifs, nous retrouvons tout d'abord l'idée qu'il y aurait eu de la surallocation de droits à polluer (Martin et Pineau (2022) et Cullenward *et al.* (2019)). Une autre raison pourrait être le fait qu'il y ait eu une croissance des émissions dans les secteurs non couverts par le programme. Cependant, l'hypothèse à laquelle nous nous intéresserons est celle soupçonnant que la méthode de calcul des émissions de GES par ECCC serait inappropriée pour comptabiliser les réductions réelles de GES réalisées par la province. En effet, alors que cette méthode représente avec justesse les émissions réalisées sur le territoire québécois, elle ne permet pas de rendre compte des interactions avec la juridiction partenaire, la Californie.

Parmi ces éléments, nous retrouvons notamment les crédits compensatoires étrangers. Il s'agit là de permis supplémentaires obtenus par les firmes lorsque ces dernières effectuent des réductions de GES dans les secteurs non-réglementés, notamment la foresterie. De plus, l'échange de permis entre les juridictions est également un élément à considérer, car le fait d'être exportateur ou importateur de permis peut avoir une incidence sur l'atteinte des objectifs de la juridiction. De ce fait, nous nous concentrons sur les permis compensatoires étrangers, mais en prenant également en compte l'effet des échanges interjuridictionnels et intertemporels de permis. Nous nous demandons si la prise en compte de ces éléments contribue à l'atteinte des objectifs fixés par le Québec, et donc si les émissions rapportées par ECCC ont bel et bien été sur-estimées.

Pour ce faire, nous allons modéliser le SPEDE. Il s'agira d'une modélisation intertemporelle de ce système qui prendra en compte les échanges de permis entre les juridictions, les crédits compensatoires et les différents types de permis. Afin de réaliser la calibration nous utiliserons les données du programme rendues disponibles pour le Québec et la Californie.

Ce mémoire se distingue de la littérature existante non seulement par le fait que nous considérons plusieurs juridictions et les échanges de permis entre ces dernières sur le plan intertemporel, mais aussi, par notre intérêt pour les crédits compensatoires.

Afin de répondre à cette question, ce mémoire suivra l'ordre qui suit. La section suivante fera l'état des connaissances présentes dans la littérature concernant les marchés du carbone. La section 3 présentera rapidement le fonctionnement du SPEDE Québec-Californie, ainsi que les données que nous utiliserons dans notre modèle. Dans la section 4, nous présenterons le modèle ainsi que la calibration. L'analyse et les résultats seront présentés dans la partie 6. Enfin, la partie 7

conclura ce mémoire.

1 Revue de littérature

Les systèmes de plafonnement et d'échange de droits d'émissions constituent un outil qui a été largement utilisé, ce qui nous permet aujourd'hui d'avoir davantage de compréhension concernant les différentes problématiques que ce type de système pourrait rencontrer.

Comme nous l'avons énoncé précédemment, il existe plusieurs raisons qui pourraient expliquer pourquoi l'objectif de l'année 2020 n'a pas été atteint. Nous passerons en revue chacune des hypothèses mentionnées ci-haut, et nous intéresserons aux informations que nous apporte la littérature les concernant. Par la suite, nous nous pencherons sur les éléments qui contribuent au bon fonctionnement d'un système de plafonnement et d'échange.

Parmi les raisons qui pourraient expliquer pourquoi la cible de réduction des émissions pour l'année 2020 a été manquée, nous avons mentionné la surallocation de droits d'émissions. En s'intéressant au marché du carbone Québec-Californie Cullenward *et al.* (2019), Martin et Pineau (2022) ainsi que Borenstein *et al.* (2017) se sont justement penchés sur cette possibilité. Par l'intermédiaire de méthodes différentes, les auteurs trouvent qu'il y aurait effectivement de la surallocation dans ce marché. Selon les résultats de Cullenward *et al.* (2019), à la fin de l'année 2018, les firmes avaient même épargné plus de permis que ce que les prévisions avaient prévu pour l'année 2020. De plus, selon cette analyse, le montant de permis excédentaires dont disposeraient les firmes serait proche de celui attendu par le *California Air Resources Board* (CARB) pour la réduction des émissions sur la période 2021-2030. De ce fait, tout comme l'indique Martin et Pineau (2022), les cibles fixées ne sont probablement pas assez contraignantes. Les firmes pourraient respecter ces dernières sans pour autant avoir à réduire leurs émissions. Borenstein *et al.* (2017) a regardé à ce problème en s'intéressant à l'évolution du prix du

carbone. Selon cette analyse, dans chaque scénario observé, pour environ 50 % des cas, le prix risque d'être celui de la borne inférieure. Révélant ainsi qu'à une offre donnée, les firmes n'ont pas besoin de tous les permis supplémentaires pour satisfaire les cibles fixées par le gouvernement.

Schatzki et Stavins (2018) s'est également intéressé au marché du carbone Québec-Californie. En s'appuyant sur les points principaux que propose le gouvernement californien quant au renouvellement du SPEDE pour la période 2021-2030, les auteurs analysent d'un point de vue économique les décisions concernant la conception du programme et font des recommandations. Contrairement aux auteurs cités précédemment, ces derniers sont sceptiques quant à l'hypothèse de surallocation. En effet, ils indiquent qu'il s'agit là de l'erreur de se concentrer sur l'atteinte de cibles annuelles, plutôt que sur des cibles d'émissions cumulatives. Une erreur qui, selon eux, à terme, pourrait causer l'augmentation des coûts de réduction des émissions.

Tel que nous pouvons le constater dans les articles précédents, l'hypothèse de surallocation dans le marché du carbone Québec-Californie ne fait pas consensus. Afin d'en savoir davantage à ce sujet, nous nous tournons donc vers le marché de carbone européen qui semble avoir connu ce problème lors de ses premières années, menant ainsi le prix du carbone de ce marché proche de zéro. Ellerman et Buchner (2008) ainsi que Anderson et Di Maria (2011) se sont également intéressés au problème de la surallocation et cherchent alors à comprendre dans quelle mesure il y a eu de la surallocation et de la réduction des émissions de GES durant les premières années du *Système d'échange de quotas d'émissions de l'Union Européenne* (SEQUE UE). Alors que dans le premier article un ratio qui contribuera à la compréhension de l'analyse est construit, le second s'appuie sur une estimation des émissions dites « statut quo », c'est-à-dire des émissions sans aucune réglementation. Bien que les articles utilisent des méthodes différentes, ils

arrivent tous deux au consensus que dans le SEQE UE, il y a bel et bien eu de la réduction des émissions de GES, mais également de la surallocation lors de la phase pilote de ce programme.

L'une des raisons supplémentaires que nous avons énoncées précédemment est l'hypothèse selon laquelle il y a eu une croissance des émissions dans les secteurs non couverts par le SPEDE. La littérature nous rapporte quelques caractéristiques concernant la couverture des émissions. Comme nous l'indique Schmalensee et Stavins (2017), dans le marché du carbone du Québec et de la Californie, la couverture des secteurs semble augmenter au cours du temps. En effet, avant 2015 le SPEDE ne considérait que le secteur industriel, et celui de l'énergie en Californie. Il a ensuite été étendu à des secteurs supplémentaires, notamment à celui des transports. Ce fut également le cas lors de la Phase II de le SEQE UE. Cependant, comme le rappelle Burtraw *et al.* (2013), il s'agit d'un paramètre particulièrement difficile à harmoniser entre deux juridictions. Enfin, afin de faire écho aux crédits compensatoires auxquels nous nous intéressons, l'article de Klemick (2012) nous renseigne sur le ratio optimal entre les crédits compensatoires et les permis en cas de couverture incomplète des émissions dans le cadre d'un SPEDE. L'instauration et l'ajustement d'un tel ratio sont un outil qui permet justement de pallier les problèmes causés par une couverture incomplète telle que la fuite d'émissions¹ par exemple. L'auteure indique que le ratio optimal devrait être proportionnel à la fuite d'émissions vers les secteurs non couverts.

Cependant, la littérature relève également des éléments qui contribuent au bon fonctionnement des SPEDE. Schmalensee et Stavins (2017) se sont justement inté-

1. Plus d'informations concernant les fuites d'émissions, encore appelées «fuite de carbone» peuvent être trouvées au lien suivant : <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/carbone/mecanismes-protoger.htm>.

ressés à 7 systèmes de plafonnement et relèvent des points clés pour la conception d'un SPEDE. Parmi les recommandations, ils mentionnent notamment la possibilité des firmes d'épargner des permis. En effet, ils indiquent que l'épargne de permis permet de lisser les dépenses des firmes au cours du temps et donc d'éviter des situations dans lesquelles le prix du carbone peut atteindre des montants considérables, ou se retrouve tout simplement proche de zéro. De même, tout comme Fell et Morgenstern (2010), l'utilisation des tunnels de prix est recommandé. Comme l'expliquent les auteurs, les tunnels de prix consistent en l'instauration de bornes supérieures et inférieures au prix du marché. Lorsque ce prix atteint la borne supérieure de nouveaux permis sont mis en ventes au prix plafond. À l'inverse, lorsque le prix du marché atteint la borne inférieure, des permis sont rachetés par le régulateur du marché à ce même prix, afin de diminuer l'offre de permis. D'après les simulations, ces derniers contribuent non seulement à réduire la volatilité des prix, mais également à diminuer les coûts de réduction des émissions.

Parallèlement, à Schmalensee et Stavins (2017), Rubin (1996) et Slechten (2013) considèrent la possibilité d'épargner et d'emprunter les permis de façon théorique. Slechten (2013) considère notamment cette question en regardant l'effet des investissements de long terme sur les échanges de permis. Ces études rejoignent ce qui a été observé de façon empirique. La mise en place de l'épargne et de l'emprunt de permis peut avoir plusieurs bénéfices. Parmi ces derniers, Rubin (1996) mentionne notamment la possibilité des firmes de changer le flux de leurs émissions à travers le temps, ce qui à terme permet de réduire les dommages sociaux. Aussi, l'épargne de permis permet également de réduire les coûts auxquels font face les entreprises. Cependant, Fell et Morgenstern (2010) relève que le fait d'imposer des restrictions sur les emprunts augmente les coûts de réduction des émissions. Ce qui à terme pourrait décourager les firmes de collaborer au SPEDE.

2 Fonctionnement du marché du carbone Québec-Californie et données

2.1 Fonctionnement du marché du carbone Québec-Californie

À l'origine d'une volonté de prendre des mesures afin de lutter contre les changements climatiques, les marchés du carbone québécois et californien voient le jour en 2013 et 2012, respectivement. Mais ce n'est qu'en 2014, que ces deux SPEDE se lient de façon bilatérale. En d'autres termes, chaque juridiction fixe individuellement sa politique, mais les permis sont utilisés de façon fongible.

Ce SPEDE fonctionne comme suit ; chaque juridiction établit des cibles d'émissions annuelles qui diminuent au cours du temps (Voir 3). Afin de respecter ces cibles d'émissions, les juridictions exigent que chaque émetteur assujéti doive posséder des droits d'émissions afin couvrir ses émissions de GES. Chaque droit d'émissions équivaut à une tonne de GES. À la fin de chaque période de conformité, les émetteurs ont l'obligation de rapporter le nombre de droits d'émissions utilisés au cours de la période. À ce jour, il n'y a que 3 périodes de conformité complétées, et pour lesquelles les données sont disponibles. La dernière étant celle regroupant les années 2018 à 2020.

Les émetteurs peuvent se procurer ces permis de cinq façons. La première est par l'intermédiaire de ventes aux enchères qu'organisent les juridictions. Ces dernières ont lieu quatre fois par année. La seconde façon est grâce à l'obtention de permis gratuits. En effet, à des fins de préservation de la compétitivité pour le secteur industriel et pour éviter la délocalisation des émissions de GES, des permis gratuits sont distribués à certains émetteurs.

Afin de respecter les cibles fixées annuellement et d'inciter les émetteurs à prendre des mesures pour réduire leurs émissions de GES, le nombre de permis alloués gratuitement diminue également au cours du temps. Cependant, à partir du 1^{er}

janvier 2024, un système de mise en consigne des émissions sera mis en place pour les émetteurs recevant des permis gratuits. La mise en vente des permis alloués gratuitement permettra aux émetteurs d'obtenir une somme qui ne devra être utilisée uniquement que pour des projets visant à la réduction des GES, tels que des investissements ou de la recherche et développement dans ce but. La Californie détient également un système similaire, cependant les revenus sont utilisés à titre de rabais aux consommateurs d'électricité résidentielle ou pour les petites entreprises etc.².

La vente de gré à gré du ministre est également une façon supplémentaire de se procurer des droits d'émissions. De plus, pour les firmes ayant réalisées des réductions d'émissions avant la mise en place du système, des crédits pour réduction hâtives ont été délivrés. Enfin, en réalisant des réductions de GES dans des secteurs non visés par le SPEDE (tels que les secteurs de l'industrie, de l'électricité, ainsi que les distributeurs de carburants et combustibles fossiles³), les émetteurs obtiennent des crédits compensatoires, qui constituent également une autre façon d'obtenir des droits d'émissions.

Il existe plusieurs types de crédits compensatoires. Parmi ces derniers nous relevons notamment ceux permettant la destruction de méthane, d'halocarbures, mais également ceux de types forestiers qui permettent la séquestration du carbone. Les crédits de type forestier sont les plus utilisés dans le marché ce qui est probablement une indication de leur faible coût unitaire. Cependant, l'efficacité de ce type de crédit est souvent remis en cause (Badgley *et al.* (2022)). Enfin,

2. <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/cap-and-trade-program/allowance-allocation/edu-ngs>

3. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/carbone/documents-spede/en-bref.pdf>

au Québec l'utilisation des crédits compensatoires ne doit pas dépasser 8 % des émissions rapportées par la firme lors des déclarations. Depuis 2021, la Californie n'autorise que 4 % des émissions rapportées pour les crédits compensatoires. Les crédits compensatoires peuvent être de plusieurs types et que ceux qui sont forestiers sont souvent les moins chers et disponible en gros volume, bien que leur efficacité soit remise en question

2.2 Données

Les données que nous utiliserons ont été colligées à partir de plusieurs sources. D'abord, des données ont été obtenues à partir des rapports de conformité propres au Québec⁴ et à la Californie⁵. Notre base de données contient des données concernant les différents types de permis rendus disponibles par les juridictions⁶ ainsi que les permis rapportés par les firmes à la fin des périodes de conformité. La base de données comporte également les émissions de gaz à effet de serre en millions de tonnes métriques équivalent de CO_2 de 2013 à 2020, avec le détail des émissions pour chaque secteur au Québec et en Californie. Les données concernant

4. Il s'agit des différents rapports pour chaque période de conformité : <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/carbone/couverture.htm>

5. Il s'agit des rapports dans la section Compliance Reports : <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/cap-and-trade-program/cap-and-trade-program-data>

6. Cette information est disponible par la compilation des informations concernant les enchères. Avant la première enchère conjointe de novembre 2014, les informations de chaque juridiction sont disponibles sur les siteweb des gouvernements québécois (Résultats : <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/carbone/ventes-encheres/avis-resultats.htm>) et californien (Summary Results Report : <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/cap-and-trade-program/auction-information/auction-notice-and-reports>).

les émissions ont été récupérées sur le site web de ECCC pour le Québec⁷ et sur celui du *California Air Resources Board* (CARB) pour la Californie⁸. Enfin, nous disposons également du rapport sur les flux nets des échanges de droits d'émission de GES entre le Québec et la Californie pour la période 2013-2020⁹.

La figure 2 représente l'évolution de l'ensemble des permis rendus disponibles au Québec et en Californie entre 2013 et 2020 en mettant en évidence le détail pour chaque type de permis. Étant donnée la faible part des crédits pour réductions hâtives pour le Québec, nous n'avons pas jugé pertinent de les inclure dans ce graphique. Comme nous pouvons le constater, au Québec comme en Californie, la majorité des permis dont disposent les firmes proviennent des permis vendus aux enchères, et de ceux alloués gratuitement aux firmes du secteur industriel. L'augmentation importante du nombre de permis alloués entre 2014 et 2015 est due à l'introduction des distributeurs de carburants et de combustibles fossiles parmi les firmes assujetties. Enfin, comme nous devrions nous y attendre, l'ensemble des permis rendus disponibles diminue au fil des années, et ce, tout en respectant le

7. Les données ont été extraites du document de Données officielles de l'inventaire des gaz à effet de serre du Canada : https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/emissions-gaz-effet-serre/inventaire.html?utm_campaign=not-applicableutm_medium=vanity-urlutm_source=canada-ca_inventaire-ges

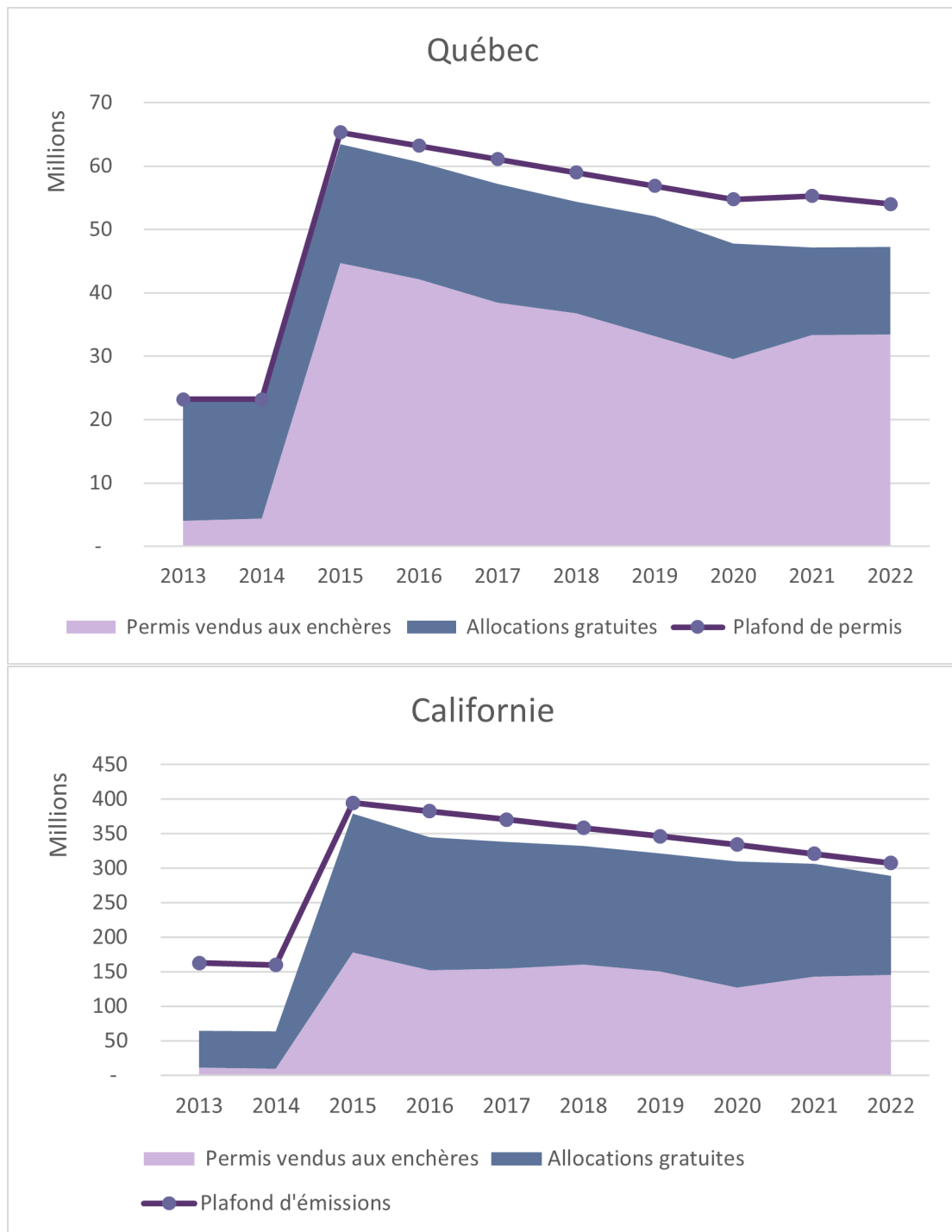
8. Les données proviennent du 2000-2020 Trends figure data : <https://ww2.arb.ca.gov/ghg-inventory-data>

9. Les données sont disponibles sur le site web du gouvernement québécois dans le document Rapport sur les flux nets 2013-2020 : <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/carbone/rapport-flux-echanges-droits-emission-ges-quebec-californie-2013-2020.pdf>

plafond établi préalablement ¹⁰.

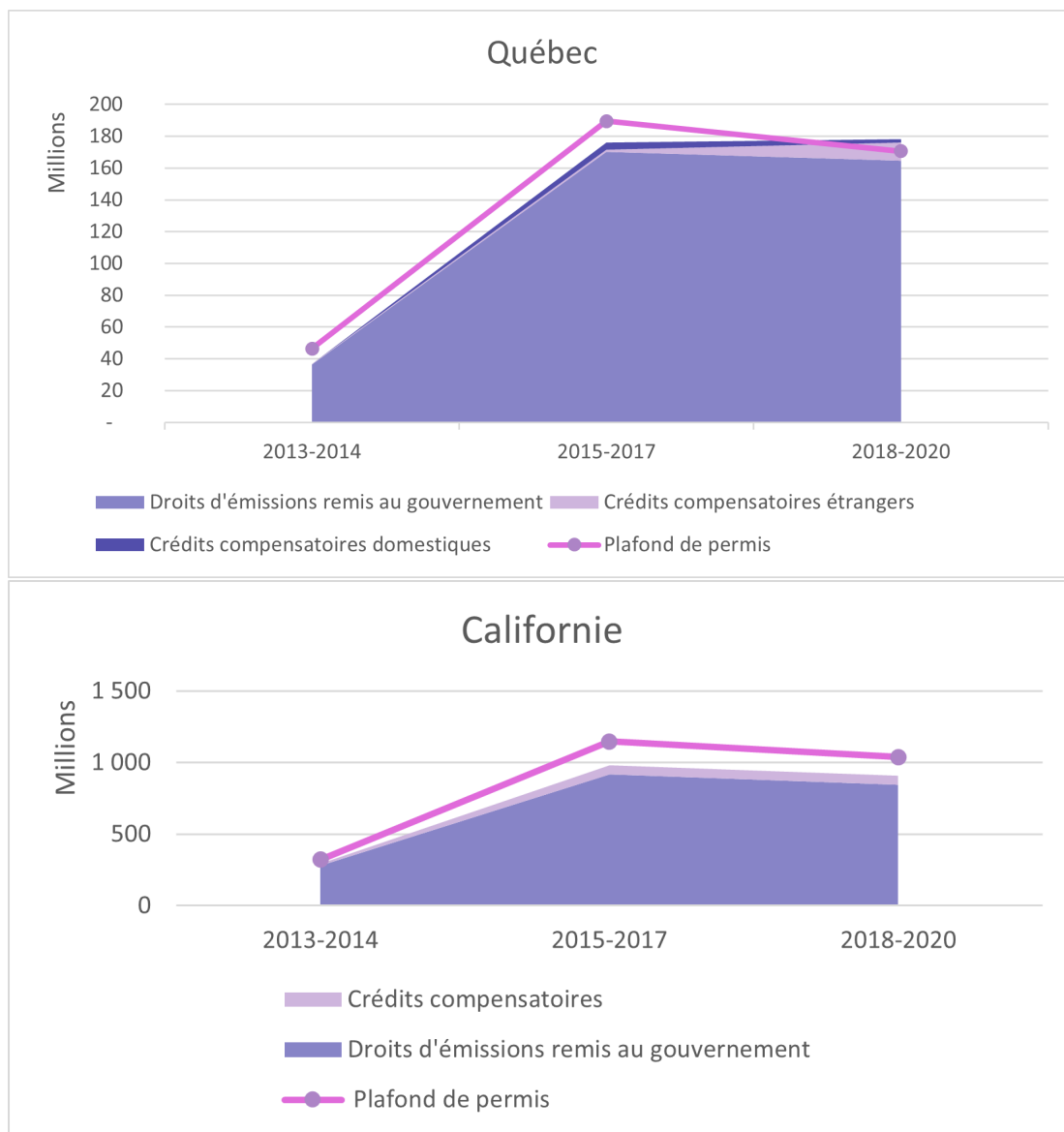
La figure 3 représente quant à elle l'évolution du nombre de chaque type de permis rapportés par les firmes lors des périodes de conformité. Lorsque les firmes rapportent le nombre de permis utilisés, elles indiquent le nombre de permis utilisés au cours de la période de conformité, et non pas par année. Ainsi, contrairement aux graphiques précédents nous ne sommes pas en mesure de présenter un graphique qui permet de voir l'évolution au cours des années. De plus, comme nous pouvons l'observer dans ces deux graphiques, et comme nous pouvons nous y attendre, pour les deux juridictions, la vaste majorité des permis utilisés par les firmes provient des permis obtenus lors des enchères et de l'allocation gratuite. Cependant, dans les rapports de conformité il n'y a pas de détails permettant de faire la distinction entre ces deux types de permis.

10. Il est important de noter que l'écart observé provient notamment de la quantité de permis placé dans le compte de réserves mentionné dans l'article 38 du RSPEDE, mais également du fait que les permis invendus peuvent être remis en vente ultérieurement.



Source : MELCCFP, CARB. Compilation réalisée par l'auteur

FIGURE 2 Évolution des permis rendus disponibles par rapport au plafond d'émissions entre 2013 et 2020



Source : MELCCFP, CARB. Compilation réalisée par l'auteur

FIGURE 3 Évolution du nombre de permis remis par les firmes par rapport au plafond

Par ailleurs, il est intéressant de noter que pour le Québec, la part des crédits compensatoires étrangers bien que faible, est de plus en plus importante à chaque

période de conformité. La part des crédits compensatoires tous confondus par rapport à l'ensemble des permis rapportés augmente cours des périodes de conformité. En effet, ces crédits représentaient moins d'1 % au cours de la première période de conformité, pour finalement représenter près de 3 % à la seconde période et 7 % à la troisième. L'utilisation de ces crédits compensatoires a notamment permis aux firmes de dépasser la somme du plafond d'émissions fixé par la province québécoise pour la dernière période.

Cependant il est important de mentionner que jusqu'à la fin de l'année 2022, le Québec ne permettait pas les crédits compensatoires dans le secteur forestier. La Californie, au contraire le permettait. Les firmes québécoises pouvaient alors obtenir des crédits compensatoires à l'étranger, par le biais du secteur forestier. Les firmes californiennes ne le pouvaient pas. Ceci explique pourquoi il n'y a pas de crédits compensatoires étrangers en Californie dans nos données.

En se référant à la figure 4, on peut observer la variation en pourcentage des émissions de chaque secteur entre 2013 et 2020 pour le Québec (a) et la Californie (b) dans le cadre du programme de plafonnement et d'échange de droits d'émissions (SPEDE). Seuls les secteurs des déchets et de l'agriculture ne sont pas couverts sur le graphique. Dans le cas du Québec, le secteur des transports ne comprend pas le transport aérien et maritime car ils ne sont pas couverts par le SPEDE. Les secteurs non couverts sont les seuls à augmenter au fil du temps, ce qui semble indiquer un effet du SPEDE. Le secteur des déchets a connu la plus forte augmentation, d'environ 25 %, alors que l'agriculture n'a augmenté que d'environ 5 %. Parmi les secteurs couverts, l'industrie manufacturière a le plus réduit ses émissions de gaz à effet de serre depuis 2013. De plus, il est également important de préciser que les émissions non couvertes par le SPEDE comprennent également les manufacturiers ou industriels émettant moins de 10 MT éq. CO_2 . Les émetteurs se trouvant entre 10 et 25 MT éq. CO_2 peuvent quant à eux adhérer volontairement

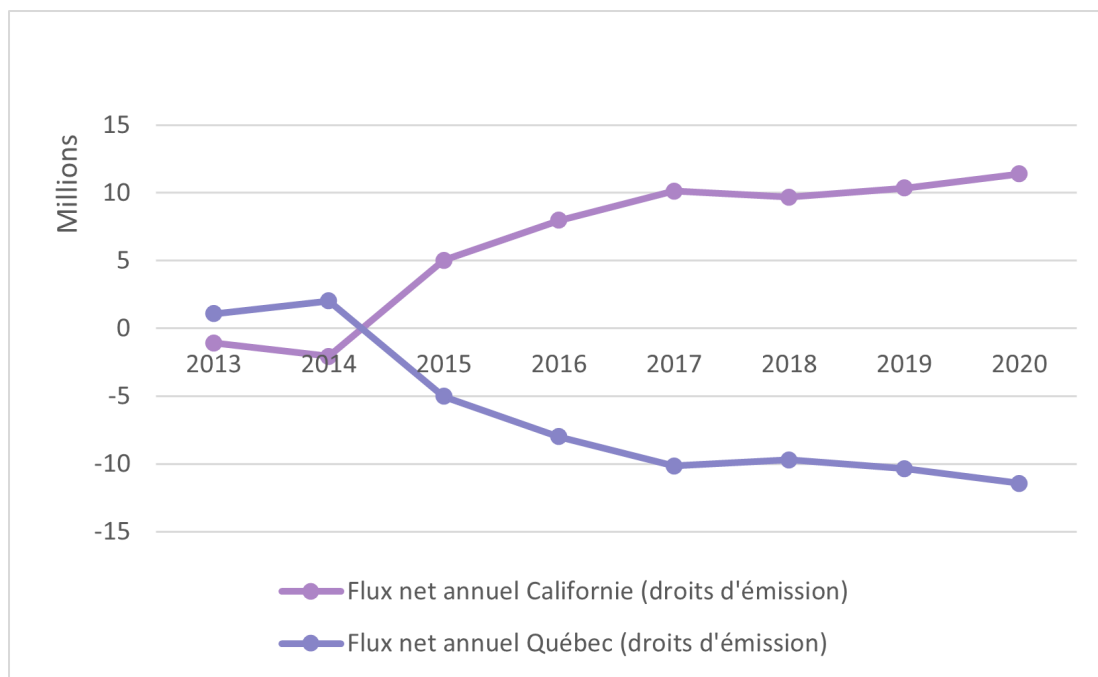
au SPEDE.

En Californie, l'échelle et l'évolution de certains secteurs au cours de ces années sont très différentes. Contrairement au Québec, le secteur de l'agriculture a connu une diminution de plus de 5 % au lieu d'une augmentation. Les secteurs de l'électricité et du Pétrole et Gaz ont considérablement diminué, de près de 36 % et 28 % respectivement. Dans le cas de la Californie, les entreprises appartenant aux secteurs de l'électricité et du gaz font partie des entités consignées. Ces entités reçoivent des allocations gratuites et peuvent les remettre lors des enchères. Comme nous l'avons mentionné précédemment, la valeur de ces permis est utilisé à titre de rabais pour les consommateurs d'électricité. La diminution considérable des émissions dans ces deux secteurs pourrait probablement témoigner de l'efficacité de ce programme.



Source : ECCC, CARB. Compilation réalisée par l'auteur

FIGURE 4 Variation en pourcentage des émissions des secteurs en 2020 par rapport à 2013



Source : MELCCFP. Compilation réalisée par l'auteur

FIGURE 5 Flux net annuels de droits d'émission

Enfin, en nous penchant sur la figure 5, nous pouvons observer les flux nets annuels des droits d'émissions entre le Québec et la Californie pour la période 2013-2020. Pour chaque année, les flux nets sont calculés en soustrayant les crédits de carbone importés et retirés par une juridiction, des crédits de carbone qu'elle a exportés et qui ont été retirés par l'autre juridiction. Ainsi, si une juridiction a exporté plus de crédits de carbone qu'elle n'en a importé, elle a un flux net positif, ce qui signifie qu'elle a été en mesure de réduire ses émissions de GES et de vendre des crédits de carbone excédentaires à l'autre juridiction, et vice versa. Ce graphique comprend non seulement les droits d'émissions mais également les crédits compensatoires. Le graphique révèle que depuis l'inclusion des distributeurs de combustibles fossiles et donc du secteur des transports en 2015 le Québec est un acquéreur net de droits d'émissions.

3 Modélisation

3.1 Modèle

Afin de mener à bien notre analyse, nous nous baserons sur les modèles de Rubin (1996) et de Fell et Morgenstern (2010). Ainsi nous choisissons de modéliser l'échange interjuridictionnel et intertemporel des droits d'émissions en prenant en compte les crédits compensatoires.

Notre modèle diffère de celui des auteurs précédents dans le sens où, afin de rendre compte du marché du carbone du Québec et de la Californie, nous ne considérerons que l'épargne de permis et non l'emprunt. De plus, nous prenons également en compte le fait qu'il s'agisse de deux juridictions avec des tailles différentes et des réglementations qui leur sont propres, telles que celles sur les crédits compensatoires par exemple.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons au problème du planificateur social, ensuite nous nous tournerons vers les firmes. Le problème auquel fait face le planificateur social est donc le suivant :

$$\max_{e_{it}, cc_{it}} \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^N [B_{it}(e_{it}) - \phi CC_{it}] \beta^t \quad (1)$$

s.c

$$\sum_{j=1}^2 \sum_{\tau=0}^t [S_{j\tau} + Y_{j\tau}] \geq \sum_{j=1}^2 \sum_{\tau=0}^t [E_{j\tau} + CC_{j\tau}] \quad (2)$$

$$cc_{it} \leq \alpha_j e_{it} \quad (3)$$

Le planificateur social cherche à maximiser les bénéfices (B_{it}) qui dépendent des émissions (e_{it}), moins les coûts liés aux crédits compensatoires (ϕCC_{it}) pour l'ensemble des firmes i de chaque juridiction sur un horizon T . Pour ce faire, il choisit

la quantité d'émissions e_{it} que la firme i doit utiliser à chaque période t , ainsi que le nombre de crédits compensatoires que la firme i peut utiliser à chaque période t . β est le facteur d'actualisation. Nous avons choisi de déterminer la juridiction à laquelle les firmes appartiennent de telle sorte que les firmes pour $i = 1$ à N_1 , se trouvent dans la première juridiction. Les firmes de $i = N_1 + 1$ à $N_2 + N_1$ font partie de la seconde juridiction.

L'équation (2) indique que les allocations gratuites $S_{j\tau}$ et les permis obtenus lors des enchères $Y_{j\tau}$ représentent le total de permis rendu disponibles par la juridiction j à la période t ¹¹. En d'autres termes, il s'agit d'une borne supérieure que les émissions de toutes les firmes $E_{j\tau}$ et les crédits compensatoires utilisés $CC_{j\tau}$ ne peuvent pas dépasser. Enfin, l'équation (3) est simplement une contrainte sur les crédits compensatoires. Elle stipule que pour chaque juridiction j les crédits compensatoires ne peuvent excéder un certain pourcentage α des émissions e_{it} .

Nous jugeons pertinent de préciser que $S_{jt} = \sum_{i=1}^N (s_{it})$. Il en est de même pour les permis achetés aux enchères, les crédits compensatoires, et également pour les émissions.

Afin de prendre des décisions, le planificateur social s'appuie également sur le choix que les firmes réalisent de façon individuelle. Le problème de la firme est donc énoncé comme tel :

$$\max_{e_{it}, y_{it}, cc_{it}} \sum_{t=0}^T [b_{it}(e_{it}) - P_t y_{it} - \phi_t cc_{it}] \beta^t \quad (4)$$

11. Il est important de préciser qu'il s'agit ici d'une simplification. Dans ce cas-ci, les ventes de gré à gré, les crédits pour réduction hâtive ainsi que la diminution des GES dans les secteurs non visés par le SPEDE ne seront pas pris en compte.

s.c

$$\sum_{\tau=0}^t (s_{i\tau} + y_{i\tau} + cc_{i\tau-1} - e_{i\tau-1}) \geq [e_{it} + cc_{it}] \quad \forall_{it} \quad (5)$$

$$cc_{it} \leq \alpha_j e_{it} \quad \forall_{it} \quad (6)$$

Chaque firme i de la juridiction j cherche à maximiser ses bénéfices qui dépendent des émissions $b_{it}(e_{it})$ moins les coûts associés à l'obtention de permis ($P_t y_{it}$) et de crédits compensatoires ($\phi_t cc_{it}$). Pour ce faire, la firme i choisit la quantité d'émissions e_{it} , le nombre de permis y_{it} à acheter lors des enchères ainsi que le nombre de crédits compensatoires cc_{it} à utiliser à chaque période t . Dans ce problème-ci, β^t est également le facteur d'actualisation. L'équation (5) indique que les émissions e_{it} de chaque firme i doivent être choisis de façon à ce que l'ensemble des émissions e_{it} réalisées au sein de la province j ne dépassent pas le total des permis rendus disponibles par cette même juridiction. Parmi les permis rendus disponibles, il y a les allocations gratuites s_{it} délivrées par le gouvernement, le nombre de permis y_{it} à acheter lors des enchères et enfin les crédits compensatoires CC_{it} par chaque firme i à chaque période t . Enfin, l'équation (6) est la même que l'équation (3) énoncée dans le problème du planificateur social précédemment.

Afin de résoudre notre problème, à partir du cas de la firme le Lagrangien associé peut être écrit :

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(e_{it}, y_{it}, cc_{it}, \lambda_t, \delta_t) &= \sum_{t=0}^T [b_{it}(e_{it}) - P_t y_{it} - \phi_t cc_{it}] \beta^t + \sum_{t=0}^T \lambda_t \sum_{\tau=0}^t (s_{i\tau} + cc_{i\tau} + y_{i\tau} - e_{i\tau}) \\ &+ \sum_{t=0}^T \delta_t (\alpha_j e_{it} - cc_{it}) \end{aligned} \quad (7)$$

Les conditions de premier ordre associées à ce problème sont les suivantes :

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial e_{it}} = b'_{it}(e_{it}) \beta^t - \sum_{\tau=t}^T \lambda_{\tau} + \delta_t \alpha_j = 0 \quad \forall_{it} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial y_{it}} = -P_t \beta^t + \sum_{\tau=t}^T \lambda_\tau = 0 \quad \forall_{it} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial cc_{it}} = -\phi_t \beta^t + \sum_{\tau=t}^T \lambda_\tau - \delta_t = 0 \quad \forall_{it} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_t} = \sum_{\tau=0}^T (s_{i\tau} + cc_{i\tau} + y_{i\tau} - e_{i\tau}) = 0 \quad (11)$$

$$\lambda_t \geq 0 \quad \sum_{\tau=0}^T (s_{i\tau} + cc_{i\tau} + y_{i\tau} - e_{i\tau}) \geq 0 \quad \forall_t \quad \text{arc.}^{12}$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \delta_t} = \alpha_j e_{it} - cc_{it} = 0 \quad (12)$$

$$\delta_t \geq 0 \quad \alpha_j e_{it} - cc_{it} = 0 \geq 0 \quad \forall_{it} \quad \text{arc.}$$

L'équation (8) nous indique que le bénéfice marginal actualisé des émissions dépend des multiplicateurs futurs λ_τ associés à la contrainte de l'équation (5) et du produit du multiplicateur δ_t associé à la contrainte de l'équation (6) et du pourcentage autorisé par les juridictions pour la remise des crédits compensatoires.

L'équation (9) quant à elle, indique que le prix actualisé des émissions dépend des multiplicateurs λ_τ futurs. La firme choisit donc le nombre de permis à acheter lors des enchères de façon à ce que le coût marginal de déplacer les émissions à une autre période est égal au prix d'un permis à chaque période t .

L'équation (10) stipule que le prix actualisé des crédits compensatoires dépend des multiplicateurs λ_τ futurs et du multiplicateur δ_t . On suppose ainsi que le prix des crédits compensatoires est inférieur à celui des permis acquis lors des enchères.

12. Avec relâchement complémentaire. En d'autres termes au moins un des deux termes est supérieur à 0.

Enfin, les équations (11) et (12) représentent le montant duquel varie le problème lorsque bouge la contrainte.

Pour chacun des problèmes énoncés ci-dessus, nous avons choisi d'utiliser une fonction de bénéfice croissante et concave. Cette fonction prendra la forme suivante :

$$B_{jt} = b_{1j}e_{it} - b_{2j}\frac{e_{it}^2}{2} \quad (13)$$

Nous avons choisi cette fonction en nous inspirant des travaux de Doda et Taschini (2017). Il s'agit d'une fonction assez simple et largement utilisée dans la littérature afin de représenter les bénéfices des émissions. Cependant, une telle fonction impose un bénéfice marginal linéaire, ce qui pourrait être en désaccord avec ce qui se passe réellement.

L'inverse de b_{2j} , soit $\frac{1}{b_{2j}}$ représente la taille de la juridiction. Ainsi, les émissions varient. Nous nous attendons à ce que les émissions de la plus grosse juridiction varient dans une intervalle plus élevé que celles de la petite juridiction.

3.2 Calibration

Afin de calibrer nos données, nous avons choisi de nous aider des travaux de Doda et Taschini (2017) et de Coutu (2016).

Afin de réaliser notre analyse empirique, nous cherchons à estimer les valeurs du bénéfice marginal afin de pouvoir les comparer aux prix du marché de carbone. L'expression du bénéfice marginal est donnée par :

$$B'_{jt} = b_{1j} - b_{2j}e_{jt} \quad (14)$$

À partir de cette fonction, les paramètres que nous chercherons donc à calibrer sont b_1 , b_2 .

Ainsi, dans les travaux cités précédemment, les auteurs définissent le logarithme des émissions non réglementées (q_i^{LF}) selon l'expression suivante :

$$\ln(q_{jt}^{LF}) = \ln(b_{2j}) + \ln(b_1 + \phi_i) \quad (15)$$

En suivant la méthode proposée dans Doda et Taschini (2017), (q_{jt}^{LF}) maximise l'équation (13). Ainsi, en ajoutant un terme d'erreur et en appliquant un logarithme au résultat, nous obtenons l'équation (15).

Après avoir appliqué le filtre Hodrick-Prescott (HP), ils décomposent alors l'expression précédente. Le premier terme à la droite de l'équation (15) correspond à la composante tendancielle des émissions avant la mise en place du SPEDE tel que :

$$\ln(b_{2j}) \cdot X = e_{i,2012}^t \quad (16)$$

Tout d'abord, dans notre papier afin d'appliquer le filtre HP nous choisissons $\lambda = 6,25$ car il s'agit de données annuelles. Ensuite, en suivant Doda et Taschini (2017) et Coutu (2016) on fixe $b_{2,CA}$ à 0,005. Ainsi, à partir de l'équation (16), nous avons :

$$\ln(0,005)X = e_{CA,2012}^t \quad (17)$$

Selon l'équation (17), X prend alors la valeur de -1,1767 . À partir de ce résultat nous pouvons trouver la valeur de $b_{2,QC}$ pour le Québec. $b_{2,QC}$ prend la valeur de

0,024. Les détails de ces calculs sont disponibles en annexe.

Ensuite, à l'aide des résultats précédents nous pouvons maintenant calibrer b_1 . En considérant l'équation (14), nous posons le bénéfice marginal de l'année 2012 comme étant égal à 0, nous avons :

$$b_{1j} - b_{2j}e_{j,2012} = 0 \quad (18)$$

En effet, à cette période, les firmes n'étant pas soumises au marché du carbone, elles cherchent à maximiser le bénéfice des émissions, ce qui conduit donc le bénéfice marginal à 0. Afin de trouver les b_1 respectifs à chaque juridiction, il suffit d'isoler ce terme, et de remplacer les variables par leurs valeurs respectives pour chaque juridiction. Cependant, afin de ne pas surestimer b_1 , nous considérons la proportion des émissions couvertes par le système, soit près de 80% des émissions. Ainsi, nous obtenons que $b_{1,CA} = 2.0012$ et $b_{1,QC} = 1.5447$. Le détail du calcul est disponible en annexe.

De plus, nous faisons l'hypothèse que le facteur d'actualisation β^t prend la valeur de 0,95.

Enfin, de notre modèle il nous reste également α_{jt} à calibrer. Pour ce faire, nous pouvons simplement nous baser sur les données fournies par les gouvernements du Québec et de la Californie. Selon ces informations, le maximum des crédits compensatoires pouvant être utilisés correspondent à 8 % des émissions pour le Québec. En raison de récentes modifications de la politique gouvernementale californienne, il s'agit de 8 % jusqu'en 2020, puis de 4 % de 2021 jusqu'à 2030 pour cette juridiction. Ainsi, $\alpha_{QC} = 8 \%$ et $\alpha_{CA} = 8 \%$, puis 4 % à partir 2020 jusqu'à 2030.

Cependant, au cours de notre analyse nous souhaitons considérer l'économie dans

son ensemble et non pas uniquement les juridictions séparément. Les paramètres que nous avons calibré précédemment sont propres à chaque juridiction. Ainsi, afin d'agrèger les équations (8) à (12), nous procédons premièrement en sommant horizontalement les équations de bénéfice du Québec et de la Californie. Ainsi, en nous appuyant sur les équations suivantes :

$$B'_{CA} = b_{1,CA} - b_{2,CA}e_{CA,t} \quad (19)$$

$$B'_{QC} = b_{1,QC} - b_{2,QC}e_{QC,t} \quad (20)$$

Et en les sommant horizontalement, nous obtenons :

$$B' = \frac{b_{1,CA}b_{2,QC} + b_{1,QC}b_{2,CA} - E_t(b_{2,QC}b_{2,CA})}{b_{2,QC} + b_{2,CA}} \quad (21)$$

Ainsi, l'équation (21) représente le bénéfice agrégé pour l'ensemble de l'économie (c'est-à-dire pour le Québec et la Californie). Le détail de ce calcul est disponible en annexe.

Enfin, afin de transformer l'équation 12 pour le cas agrégé de l'ensemble de l'économie, il nous faut également déterminer une α_j , c'est-à-dire la proportion de la limite d'utilisation des crédits compensatoires en proportion des émissions, pour l'ensemble de l'économie. Pour ce faire nous choisissons simplement de faire la somme pondérée des paramètres selon le poids de la juridiction au sein de cette économie. En considérant ω comme étant le poids associé à la taille du Québec, et en faisant le rapport de la somme des émissions totales de chaque juridiction, nous avons donc que $\omega = 16 \%$. De plus étant donnée que les valeurs de α_{CA} changent au cours du temps, il a été décidé de pondérer la valeur de ce paramètre

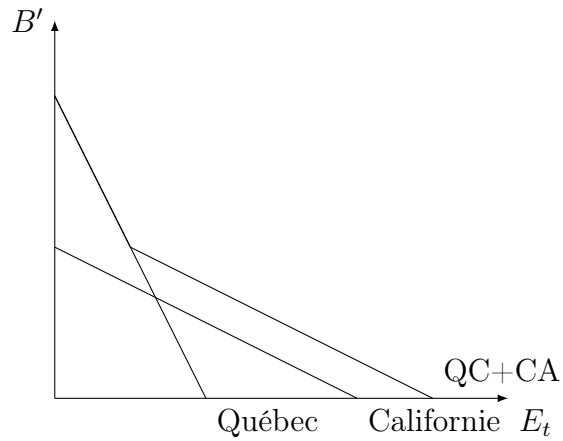


FIGURE 6 Bénéfices agrégés pour le Québec et la Californie

Juridictions	b_2	α_j	β
Californie	0,005	8 % et 4 %	0,95
Québec	0,024	8 %	0,95
Californie + Québec	0,5	6,02 %	0,95

TABLEAU 1 Paramètres

en fonction de la durée de la politique. Ainsi, nous pouvons écrire :

$$\alpha = 0,16\alpha_{QC} + (1 - 0,16)\alpha_{CA} \quad (22)$$

La valeur de α est donc 6,02 %.

Le Tableau 1 résume la valeur des paramètres trouvés.

4 Analyses et résultats

Afin de mener notre analyse nous procéderons en trois étapes. Tout d'abord, en utilisant les conditions de premier ordre, nous procéderons à une analyse théorique pour identifier les différents scénarios auxquels la situation actuelle du SPEDE pourrait correspondre. Par la suite, à l'aide des données dont nous disposons, nous effectuerons l'analyse empirique qui nous permettra alors de statuer de quelle situation il s'agit réellement. Enfin, nous discuterons des résultats que nous aurons trouvés.

4.1 Analyse théorique

Tel que nous l'avons vu, la littérature diverge encore concernant les suppositions de surallocation dans le marché du carbone entre le Québec et la Californie. Certains tels que Martin et Pineau (2022) et Cullenward *et al.* (2019) argumentent que trop de permis ont bel et bien été alloués alors que Schatzki et Stavins (2018) réfute cette piste.

Nous avons donc choisi d'ajouter aux analyses sur la question en nous appuyant sur le modèle que nous avons développé dans la section précédente. Nous considérons ainsi plusieurs scénarios et leurs différents cas de figure. Ces derniers diffèrent selon les hypothèses que nous fixons sur les multiplicateurs de Lagrange. Nous nous appuierons sur les conditions de premier ordre de notre modèle afin de connaître les possibles situations dans lesquelles le SPEDE pourrait se trouver.

En ne considérant que deux périodes, les équations (8) à (10) peuvent être réécrites telles que :

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial e_{i0}} = B'_{i0}(e_{i0}) - \lambda_0 - \lambda_1 + \delta_0 \alpha = 0 \quad (23)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial y_{i0}} = -P_0 + \lambda_0 + \lambda_1 = 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial CC_{i0}} = -\phi_0 + \lambda_0 + \lambda_1 - \delta_0 = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial e_{i1}} = B'_{i1}(e_{i1})\beta - \lambda_1 + \delta_1 \alpha = 0 \quad (26)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial y_{i1}} = -P_1\beta + \lambda_1 = 0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial CC_{i1}} = -\phi_1\beta + \lambda_1 - \delta_1 = 0 \quad (28)$$

À partir de notre modèle nous rappelons que lorsque le multiplicateur de Lagrange est égal à 0, nous sommes en situation de surallocation. En effet, la contrainte étant non mordante, les firmes peuvent donc épargner davantage de permis. À l'inverse, lorsque le multiplicateur est supérieur à 0, la contrainte est mordante et les firmes ne peuvent pas se permettre d'épargner des permis.

Cas 1

La première hypothèse que nous abordons est celle de la surallocation à chaque période ($\sum_{j=1}^2 [S_{jt} + Y_{jt} - E_{jt}^{BAU}] > 0 \quad \forall t$). En d'autres termes, il s'agit d'une situation dans laquelle trop de permis sont alloués et les firmes ont donc la possibilité d'ajouter des permis à leur banque à chaque période.

Dans ce scénario le seul cas que nous pouvons étudier est celui où tous les multiplicateurs sont nuls :

$$— \lambda_0 = 0, \lambda_1 = 0, \delta_0 = 0 \text{ et } \delta_1 = 0$$

Proposition 1

Dans le cas où il y aurait de la surallocation à chaque période ($\sum_{j=1}^2 [S_{jt} + Y_{jt} - E_{jt}^{BAU}] > 0 \quad \forall t$) les firmes épargnent des permis à chacune de ces périodes. Les prix des permis et des crédits compensatoires devraient donc tous être égaux à 0.

Le seul cas qui peut être étudié est celui où $\lambda_0 = 0, \lambda_1 = 0, \delta_0 = 0$ et $\delta_1 = 0$.

Sous ces conditions, les prix peuvent effectivement être nuls.

Preuve

Comme nous l'avons mentionné précédemment, à partir des équations (9) et (10), nous comprenons que le prix d'un permis et celui d'un crédit compensatoire dépendent de l'ensemble des multiplicateurs futurs.

Étant dans une situation de surallocation à chaque période, nous considérons le cas où les prix des permis et des crédits compensatoires sont nuls pour toutes les périodes, car il s'agit là du seul choix logique dans ce cas. En effet, dans le cas extrême où l'offre de permis serait largement supérieur à la demande, les prix se retrouveraient à 0.

Ainsi, en reprenant l'équation (27), nous constatons que si $P_1 = 0$, alors l'hypothèse posée sur $\lambda_1 = 0$ est respectée. Ensuite, à partir de l'équation (28), si $\phi_1 = 0$ et que $\lambda_1 = 0$ alors l'hypothèse sur δ_1 est également bel et bien respectée. De l'équation (24), avec $P_0 = 0$ et $\lambda_1 = 0$ alors λ_0 prend la valeur de 0. Enfin, avec

l'équation (25) lorsque $\phi_0 = \lambda_1 = \lambda_0 = 0$ alors $\lambda_0 = 0$. Nous concluons donc que la surallocation à chaque période est une situation où le SPEDE peut se situer. Nous appliquerons une réflexion similaire aux prochains scénarios.

Cas 2

Le second scénario est celui de la surallocation globale ($\sum_{j=1}^2 \sum_{t=0}^1 [S_{jt} + Y_{jt} - E_{jt}^{BAU}] \geq 0$). En d'autres termes, il s'agit là d'une situation où le marché du carbone se trouve dans un cas de surallocation sans que nécessairement trop de permis soient alloués à chaque période comme dans le scénario précédent. Dans ce cas-ci, il existe trois propositions à explorer. Nous regrouperons ces dernières selon leur possibilité d'exister dans le SPEDE.

Proposition 2

Lorsque trop de permis sont globalement alloués ($\sum_{j=1}^2 \sum_{t=0}^1 [S_{jt} + Y_{jt} - E_{jt}^{BAU}] \geq 0$), les firmes peuvent épargner à chaque période. Dans cette situation, nous nous attendons à ce que tous les prix soient nuls.

Ainsi, un des cas possible est celui où $\lambda_0 = 0, \lambda_1 = 0, \delta_0 = 0$ et $\delta_1 = 0$.

Sous ces conditions, les prix peuvent effectivement être nuls.

Preuve

Voir le Cas 1.

Proposition 3

Lorsque trop de permis sont globalement alloués ($\sum_{j=1}^2 \sum_{t=0}^1 [S_{jt} + Y_{jt} - E_{jt}^{BAU}] \geq 0$), les firmes peuvent se permettre d'épargner uniquement à la dernière période. Pour les prix, cette décision impliquerait que $P_1 = 0, \phi_1 = 0, P_0 > 0$ et $\phi_0 > 0$.

Plus formellement, cette situation correspondrait à $\lambda_0 > 0, \lambda_1 = 0, \delta_0 > 0$ et $\delta_1 = 0$.

Sous ces conditions, les implications pour les prix sont respectées.

Preuve

Le troisième cas de figure auquel nous nous intéressons est celui où les firmes décident d'épargner uniquement à la dernière période. Ici, l'ensemble des prix que nous considérons est le suivant $P_1 = 0, \phi_1 = 0, P_0 > 0$ et $\phi_0 > 0$. Tout en reprenant l'analyse que nous avons effectuée précédemment, les hypothèses sur les prix sont respectées.

Ainsi, il s'agit d'un scénario qui peut exister dans ce marché.

Proposition 4

Si trop de permis sont globalement alloués ($\sum_{j=1}^2 \sum_{t=0}^1 [S_{jt} + Y_{jt} - E_{jt}^{BAU}] \geq 0$), alors il est impossible que les firmes épargnent uniquement à la dernière période.

Si les firmes décident d'épargner uniquement à la période 1. Cette décision impliquerait que $P_1 > 0, \phi_1 > 0, P_0 = 0$ et $\phi_0 > 0$.

Ainsi plus formellement, une des situations possibles est celle où $\lambda_0 = 0, \lambda_1 > 0, \delta_0 = 0$ et $\delta_1 > 0$.

Sous ces conditions, les implications pour les prix ne sont pas respectées. Il s'agit d'un scénario qui ne peut pas exister dans ce marché.

Preuve

En partant de l'hypothèse que $\lambda_0 = 0$, $\lambda_1 > 0$, $\delta_0 = 0$ et $\delta_1 > 0$, nous considérons alors que $P_1 > 0$, $\phi_1 > 0$, $P_0 = 0$ et $\phi_0 > 0$. Tout comme le scénario précédent, la démarche est la même. À partir de l'équation (27), on a que λ_1 est bien supérieur à 0. L'équation (28) nous indique que $\delta_1 > 0$ si $\lambda_1 > \phi_1\beta$. L'équation (24) révèle que $\lambda_0 = 0$ si $\lambda_1 = P_0$. Enfin, de l'équation (25) avec $\lambda_1 > 0$ et $\lambda_0 = \phi_0 = 0$, δ_0 ne peut être égal à 0.

Ainsi, il ne s'agit donc pas d'une situation dans lequel le SPEDE pourrait se trouver.

Cas 3

La scénario suivant est celui où nous considérons une situation où le marché est contraignant à chaque période ($\sum_{j=1}^2 [S_{jt} + Y_{jt} - E_{jt}^{BAU}] < 0 \quad \forall t$). Autrement dit, à chaque période les firmes ne disposent pas de suffisamment de permis pour se permettre d'en épargner. Le nombre de permis rendus disponibles est inférieur aux émissions sans réglementation. Il s'agit là du cas inverse du premier scénario.

Proposition 5

Dans le cas d'un marché contraignant à chaque période ($\sum_{j=1}^2 [S_{jt} + Y_{jt} - E_{jt}^{BAU}] < 0 \quad \forall t$) les firmes n'épargnent jamais de permis. Dans cette situation ci, l'ensemble des prix que nous considérons est $P_1 > 0$, $\phi_1 > 0$, $P_0 > 0$ et $\phi_0 > 0$.

Cette situation correspondrait à ce que $\lambda_0 > 0, \lambda_1 > 0, \delta_0 > 0$ et $\delta_1 > 0$.

Sous ces conditions, les implications pour les prix sont respectées.

Preuve

Tout comme pour le premier cas, l'analyse est similaire.

À partir de l'équation (27), en supposant que $P_1 > 0$ l'hypothèse posée sur $\lambda_1 > 0$ tient. En regardant ensuite à l'équation (28), avec $\phi_1 > 0$ et $\lambda_1 > 0$, l'hypothèse sur δ_1 tient également. En faisant de même avec les équations (24) et (25) nous sommes en mesure de conclure qu'il s'agit d'un scénario plausible pour le SPEDE.

Cas 4

Enfin le dernier scénario est celui où le SPEDE est globalement contraignant ($\sum_{j=1}^2 \sum_{t=0}^1 [S_{jt} + Y_{jt} - E_{jt}^{BAU}] \leq 0$). Il s'agit d'un scénario similaire au second. En effet, dans ce dernier scénario, il existe des périodes pour lesquelles les firmes peuvent se permettre d'épargner. Tout comme pour la seconde proposition, notre premier cas de figure sera exactement identique à celui que nous venons de résoudre pour la proposition 3. Le résultat est également le même.

Proposition 6

Dans le cas d'un marché globalement contraignant ($\sum_{j=1}^2 \sum_{t=0}^1 [S_{jt} + Y_{jt} - E_{jt}^{BAU}] \leq 0$) les firmes peuvent choisir de ne jamais épargner. Nous supposons donc que l'ensemble des prix est tel que : $P_1 > 0, \phi_1 > 0, P_0 > 0$ et $\phi_0 > 0$.

Sous ces conditions, les implications pour les prix sont respectées.

Preuve

Voir le Cas 3.

Proposition 7

Dans le cas d'un marché globalement contraignant ($\sum_{j=1}^2 \sum_{t=0}^1 [S_{jt} + Y_{jt} - E_{jt}^{BAU}] \leq 0$) les firmes peuvent choisir de n'épargner qu'à la première période. Nous supposons donc que l'ensemble des prix est tel que : $P_1 > 0, \phi_1 > 0, P_0 > 0$ et $\phi_0 > 0$.

$\lambda_0 = 0, \lambda_1 > 0, \delta_0 = 0$ et $\delta_1 > 0$

Sous ces conditions, les implications pour les prix sont respectées.

Preuve

Comme pour les cas précédents, à partir de l'équation (27), en supposant que $P_1 > 0$ l'hypothèse posée sur $\lambda_1 > 0$ tient. De l'équation (28), en supposant $\phi_1 > 0$ et $\lambda_1 > 0$, l'hypothèse sur δ_1 tient également. À partir de l'équation (24), si $\lambda_1 > 0$ et $P_0 > 0$, alors $\lambda_0 = 0$ si $\lambda_1 = P_0$. Enfin, l'équation (25) indique que si $\lambda_1 > 0$ et $\phi_0 > 0$, $\lambda_0 = 0$ alors $\delta_0 = 0$ si $\lambda_1 = \phi_0$.

Ainsi, le cas de la surallocation à chaque période, tout comme les deux scénarios dans lesquels le SPEDE pourrait être contraignant constituent des situations qui pourraient exister dans le SPEDE. Cependant, le scénario de surallocation globale dans lequel les firmes décident d'épargner à la dernière période ne peut pas exister dans ce marché.

Le tableau 4, disponible en annexe, résume l'ensemble de cette analyse théorique.

4.2 Analyse empirique

Comme nous l'avons mentionné précédemment, pour l'analyse empirique nous allons utiliser les CPO du modèle que nous avons développé.

Tout d'abord avant d'analyser la situation du marché du carbone à l'aide du modèle que nous avons développé précédemment, nous jugeons qu'il est pertinent d'avoir une idée de la capacité du système à dépasser les plafonds d'ici l'objectif de 2030. Pour ce faire, nous allons considérer 2 cas. Nous examinerons un scénario dit « optimiste » et un scénario dit « pessimiste ».

La figure 7 nous permet premièrement de nous représenter ce qui se passe sur le marché actuellement. Cette figure rend compte des plafonds communs et de l'ensemble des unités millésimés (rose) et des crédits compensatoires (gris) entre la Californie et le Québec de la seconde période de conformité (notée ici période 0) jusqu'à l'objectif de 2030.

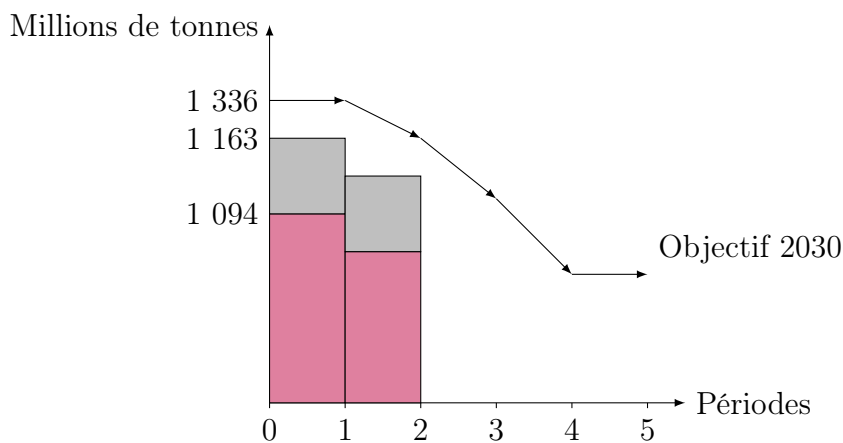


FIGURE 7 Évolution des plafonds et des permis épargnés de 2013 à 2030

Ainsi, le plafond total pour les deux juridictions s'élève à 1 336 millions de tonnes pour la seconde période de conformité. En prenant en compte les permis déjà

remis et les crédits compensatoires déclarés par les entreprises entre 2013¹³ et 2017, les firmes détiendraient en épargne près 173 millions de crédits carbone.

De la période de conformité de 2018 à 2020, ce sont près de 107 millions de tonnes additionnelles que les firmes auraient épargnés.

Le tableau 4 rendant compte des nouveaux plafonds, des permis rendus par les firmes et des permis compensatoires pour l'ensemble des deux juridictions à chaque période de conformité est disponible en annexe. Ce dernier nous permet de voir l'évolution de ces éléments au cours des périodes de conformité jusqu'à l'année 2029.

Tournons-nous premièrement vers le scénario optimiste. Il s'agit ici du scénario dans lequel nous supposons que de vraies réductions ont été réalisées par les crédits compensatoires. En considérant ce scénario, nous comparerons le nombre de permis restants sans prendre en compte les crédits compensatoires. En effet, si sans l'aide des crédits compensatoires les firmes réalisent de vraies réductions on peut supposer que l'objectif de 2030 sera atteint.

L'évolution des plafonds pour le scénario optimiste est la même que celle de la figure 7. Selon ce scénario, les firmes auraient épargné près de 295 millions de permis entre 2013 et 2017. Lors de la troisième période de conformité ce chiffre s'élèverait à près de 184 millions.

Le scénario pessimiste quant à lui requiert une comparaison qui considère les crédits compensatoires. Dans ce cas, il est alors judicieux de gonfler les plafonds afin de prendre en compte les pourcentages maximum d'utilisation des crédits compensatoires pour chaque juridiction. En effet, ceci nous permet de représenter le

13. Étant donnée la quantité négligeable de permis restants de la première période de conformité, nous avons choisi de combiner les permis des deux premières périodes de conformité

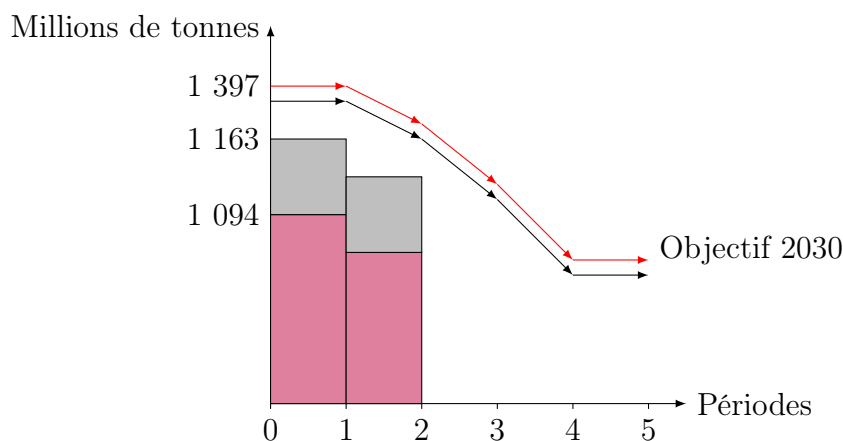


FIGURE 8 Évolution des plafonds et des permis épargnés de 2013 à 2030 sous un scénario pessimiste

cas où les firmes choisissent d'utiliser ces crédits jusqu'à la limite maximale qui leur est permise. Afin de représenter au mieux la situation du SPEDE, nous avons choisi de prendre en compte le fait que les firmes ne peuvent reporter qu'un maximum 8 % des émissions sous forme de crédits compensatoires. Ainsi, le plafond du Québec pour chaque période de conformité sera augmenté de ce montant. Pour la Californie, comme nous l'avons mentionné lors de la calibration, le plafond sera augmenté de 8 % jusqu'en 2020 et de 4 % jusqu'en 2030. La figure 8 illustre le marché du carbone en prenant en compte les nouveaux plafonds du scénario pessimiste. Ainsi, selon le tableau 4 et en comparant les montants restants entre les nouveaux plafonds de la seconde période de conformité et les permis rapportés par les firmes et les crédits compensatoires entre 2013 et 2017, il manquerait près de 234 millions de tonnes pour dépasser les objectifs fixés par les deux juridictions. En regardant à la troisième période de conformité, ce sont près de 204 millions de tonnes qu'il manquerait afin de pouvoir dépasser l'objectif commun pour les deux juridictions.

Comme il a été mentionné, nous utiliserons maintenant les équations (8) à (12)

pour l'ensemble de l'économie. De façon agrégée, ces dernières peuvent être réécrites telle que :

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial E_t} = B'_t(E_t)\beta^t - \sum_{\tau=t}^T \lambda_\tau + \delta_t \alpha_j = 0 \quad \forall_t \quad (29)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial Y_t} = -P_t \beta^t + \sum_{\tau=t}^T \lambda_\tau = 0 \quad \forall_t \quad (30)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial CC_t} = -\phi_t \beta^t + \sum_{\tau=t}^T \lambda_\tau - \delta_t = 0 \quad \forall_t \quad (31)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_t} = \sum_{\tau=0}^T (S_\tau + CC_\tau + Y_\tau - E_\tau) = 0 \quad (32)$$

$$\lambda_t \geq 0 \quad \sum_{\tau=0}^T (S_\tau + CC_\tau + Y_\tau - E_\tau) \geq 0 \quad \forall_t \quad \text{arc.}$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \delta_t} = \alpha_j E_t - CC_t = 0 \quad (33)$$

$$\delta_t \geq 0 \quad \alpha_j E_t - CC_t = 0 \geq 0 \quad \forall_t \quad \text{arc.}$$

Nous choisissons de considérer ce problème sur 5 périodes de conformité. La première période est celle de 2015 à 2017 et la dernière période est celle de 2027 à 2029, comme il était le cas dans le tableau 4.

Tout d'abord afin de trouver les valeurs des λ pour chaque période de conformité nous pouvons utiliser l'équation (30). À partir de celle-ci, nous avons :

$$-P_t \beta^t + \sum_{\tau=t}^T \lambda_\tau = 0$$

$$P_t = \frac{\sum_{\tau=t}^T \lambda_\tau}{\beta^t}$$

Ainsi, il nous suffit simplement d'effectuer la différence entre les prix de chaque période en prenant en compte β^t afin de trouver les valeurs des premiers multiplicateurs. Pour ce faire, nous utilisons les prix moyens pondérés pour chaque période.

Les données pour les prix des enchères étant uniquement disponibles jusqu'au début de l'année 2023, nous chercherons donc à faire une projection afin de comprendre ce qui se passera à partir de la 3^e période.

À partir des données dont nous disposons, la valeur des prix moyens pondérés pour les trois premières périodes de conformité que nous considérons dans notre analyses sont respectivement de 17,33 \$, 21,49 \$ et 32,29 \$. En effectuant la différence du produit du prix et du facteur d'actualisation entre les périodes de conformité comme énoncé précédemment, nous trouvons que $\lambda_1 = (21,49 * 0,95) - (17,33 * 0,95) = 3,96$ et que $\lambda_2 = (32,29 * 0,95) - (21,49 * 0,95) = 10,26$.

Aux vues de ces valeurs de λ , et en faisant le parallèle avec l'analyse théorique que nous avons effectué précédemment, nous pouvons statuer que le SPEDE se trouve fort probablement dans les cas 3 et 4. En effet, il s'agit des cas pour lesquels le λ de la première période est positif. Il est cependant pertinent de noter que pour le cas 4, il s'agit plus précisément de la situation où les firmes décident de ne jamais épargner, donc de la proposition 6.

Ainsi, selon notre analyse, le SPEDE serait un système contraignant dans lequel les firmes ne pourraient pas se permettre d'épargner dans les périodes futures.

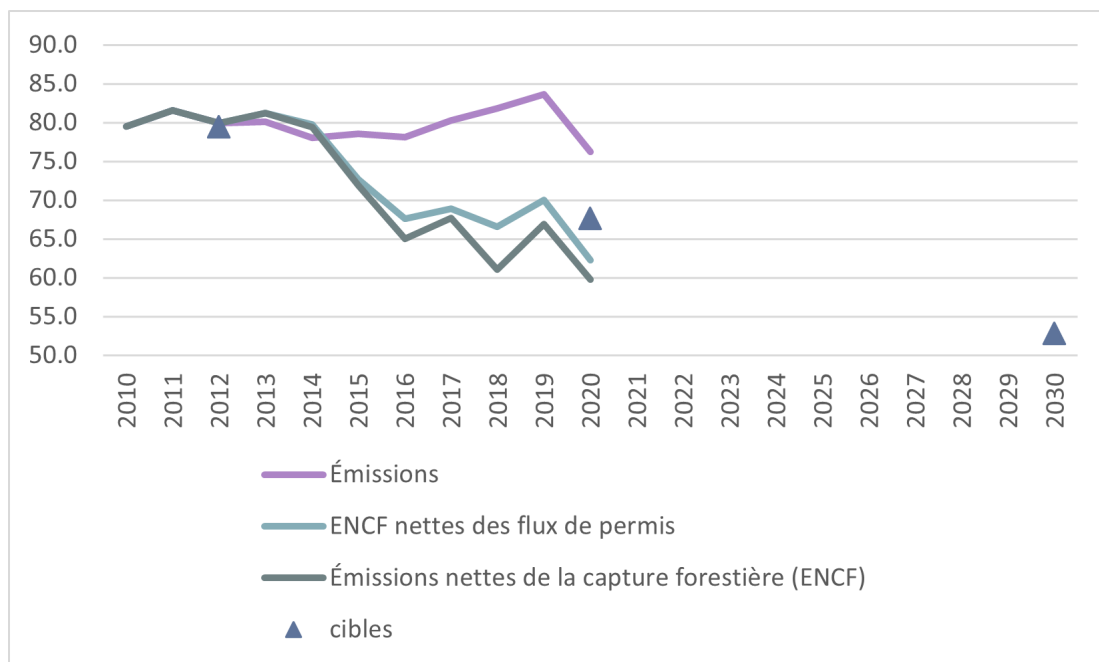
4.3 Résultats

Selon nos résultats, bien que le système soit contraignant, cela ne garantit pas que l'objectif de 2030 sera atteint. Nous choisissons alors d'effectuer une projection afin

d'avoir une idée de ce qui pourrait se passer lors des périodes futures.

La figure 9¹⁴ représente l'évolution des émissions qui prend en compte les flux de permis et les crédits compensatoires forestiers au Québec. Comme nous pouvons le constater, la seule prise en compte des flux de permis permet l'atteinte de la cible pour l'année 2020. En considérant également la capture forestière des émissions, les émissions nettes du Québec atteignent près de 60 Mt d'éq. CO_2 , soit 29 % de moins par rapport à 1990, au lieu de 27,5 %. La prise en compte des flux de permis et des crédits compensatoires étrangers apparaît donc comme un élément majeur dans la mesure de l'atteinte des objectifs de la province.

14. Les émissions nettes de la capture forestières ont été calculées de la manière suivante : Les crédits compensatoires forestiers dans les rapports de conformité ont été agrégés par année. La somme des crédits compensatoires attribués pour des projets antérieurs au commencement du programme a été répartie sur toutes les années à partir de 2013. La somme de ces deux éléments a été soustrait des émissions.



Source : ECCC, CARB. Compilation réalisée par l'auteur

FIGURE 9 Évolution des émissions en prenant en compte les flux de permis et les crédits compensatoires forestiers entre 2010 et 2030

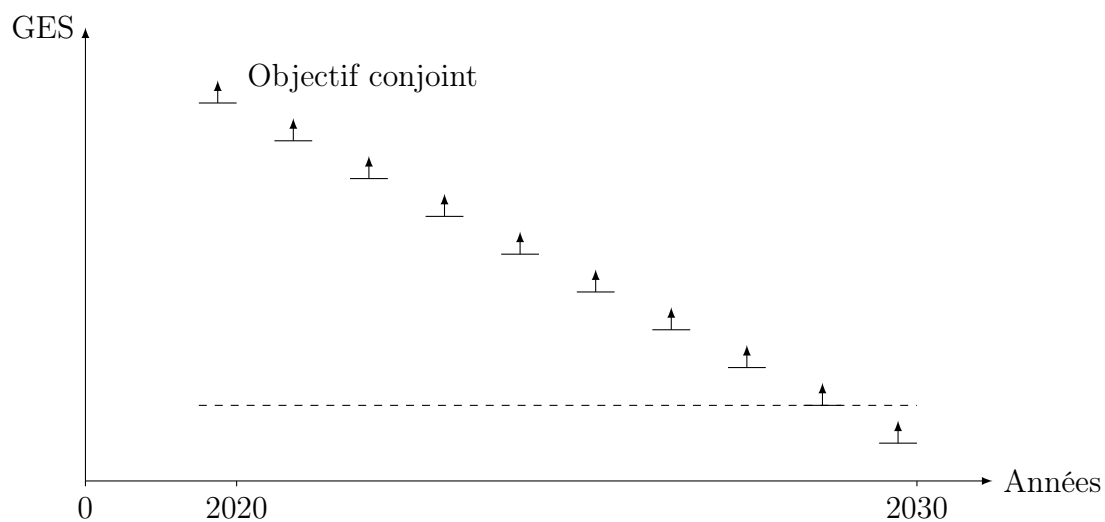


FIGURE 10 Évolution des objectifs conjoints au cours des années

Nous jugeons pertinent d'effectuer notre analyse en regardant l'ensemble du programme, donc avec les juridictions conjointes. Ainsi, tout d'abord, nous allons considérer les objectifs conjoints des juridictions. La figure 10 illustre l'évolution des objectifs entre les années 2020 et 2030. Pour l'année 2020, l'objectif de la Californie consistait à réduire ses émissions au niveau de 1990. En le couplant à celui du Québec, l'objectif conjoint des deux juridictions s'élève à près de 494,2 Mt d'éq. CO_2 . Quant à l'objectif de 2030, les émissions des deux provinces devront cumuler près de 300 Mt d'éq. CO_2 . Cependant, il est important de rappeler que ces émissions ci comprennent les émissions non réglementées.

De plus, il est intéressant de rappeler que l'atteinte de ces objectifs pourrait être affectée par les permis épargnés par les firmes depuis le début du programme. Comme nous l'avons analysé précédemment, les firmes détiennent plus de 200 millions de permis. Plus précisément, selon le rapport du gouvernement, en 2020 les firmes détenaient près de 237 millions de permis en épargne¹⁵. Nous supposons que l'utilisation des permis épargnés par les firmes est répartie de façon équivalente entre 2021 et 2030.

Ainsi, afin de projeter les plafonds nous faisons l'hypothèse que les firmes continueront de rapporter leur permis et leur crédits compensatoires à la fin de chaque période de conformité à une proportion similaire aux années précédentes. Ainsi, nous utilisons le taux moyen des permis utilisés par les firmes pour les périodes passées. Pour les crédits compensatoires nous procédons de façon similaire, en prenant en compte le fait que les firmes québécoises ne peuvent pas rapporter plus de 8 % de leurs émissions sous formes de crédits compensatoires et 4 % pour

15. Ces données sont disponibles au lieu suivant dans la section Possession et échanges de droits d'émission : <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/carbone/documentation.htm#possession-transfert>

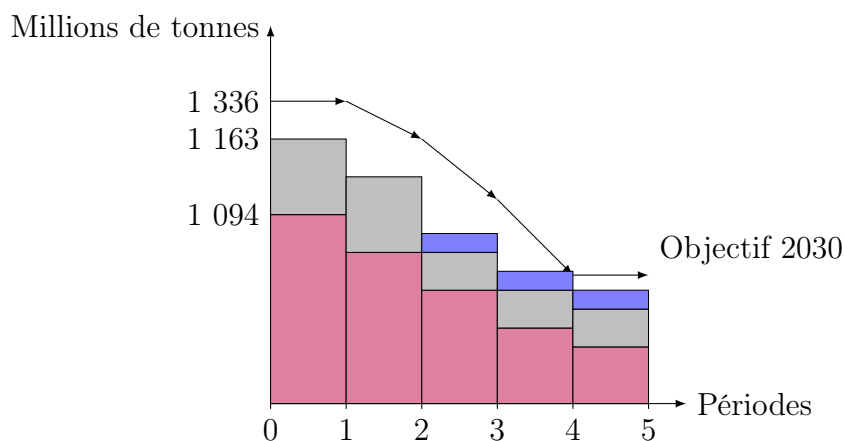


FIGURE 11 Évolution des plafonds, des permis épargnés et des crédits compensatoires de 2013 à 2030

celles de la Californie.

Afin d'évaluer si le SPEDE atteindra son objectif, nous jugeons pertinent d'ajouter aux permis rapportés et aux crédits compensatoires les permis épargnés depuis le début du programme jusqu'à 2020. Comme nous l'avons mentionné précédemment, ces derniers seront répartis de façon équivalente entre chaque période de conformité. La figure 11 représente ainsi une synthèse de nos résultats.

Ainsi, comme nous pouvons le voir, malgré l'ajout des crédits épargnés, les firmes réglementées par le SPEDE atteindront l'objectif conjoint de réduction des GES.

Néanmoins l'atteinte de l'objectif par l'ensemble de l'économie dépend également de l'évolution du secteur non couvert par le SPEDE. Comme nous l'avons vu à la figure 4, il s'agit de secteurs dont les émissions ont augmenté depuis la mise en place du SPEDE en 2013. Rappelons que pour le Québec, entre 2013 et 2020 les émissions liées aux déchets ont augmenté de près de 25 % et celles de l'agriculture d'environ 5 %.

Périodes	Québec	Californie	Québec + Californie
2015-2017	42 860 000	122 000 000	164 860 000
2018-2020	44 680 000	121 600 000	166 280 000

TABLEAU 2 Émissions des secteurs non couverts

Ainsi en comparant les secteurs non couverts des deux juridictions pour les périodes dont nous disposons des données, nous pouvons nous situer quant au rôle que joueront les secteurs non couverts dans les périodes futures. Le détail des émissions non couvertes est disponible au tableau 2.

Pour la période 2015-2018, les émissions des secteurs non couverts des deux juridictions s'élevaient à près de 164 Mt d'éq. CO_2 . En prenant en compte ces émissions non régulées, le plafond commun de 1 336 Mt d'équ. CO_2 pour l'ensemble de cette période n'est toujours pas atteint. Cependant, à partir de la période 2018-2020 les émissions non régulées des deux juridictions s'élèvent à près de 166 Mt d'équ. CO_2 . et dépassent le plafond commun.

Comme nous l'avons vu, depuis la mise en place du SPEDE les émissions de ces secteurs ont augmenté. Ainsi, en prenant la moyenne des émissions conjointes non réglementées passées, nous pouvons essayer d'estimer ce que cela impliquera pour les périodes futures. Selon nos résultats, même dans le cas où les émissions de ces secteurs demeureraient constantes cela poserait un problème pour l'atteinte des objectifs dans les périodes futures.

Afin de parfaire notre analyse il est intéressant de considérer les crédits compensatoires selon leur nature. Rappelons que ces permis sont délivrés lors de projets qui permettent la capture du carbone. Ainsi, nous pouvons considérer l'hypothèse selon laquelle les crédits compensatoires sont fiables et compensent réellement les émissions de GES. Dans ce cas-ci, nous pouvons nous permettre d'exclure les cré-

dits compensatoires de notre calcul. En effet, grâce à ces derniers, au net, il n’y a pas d’émissions supplémentaires dans l’atmosphère.

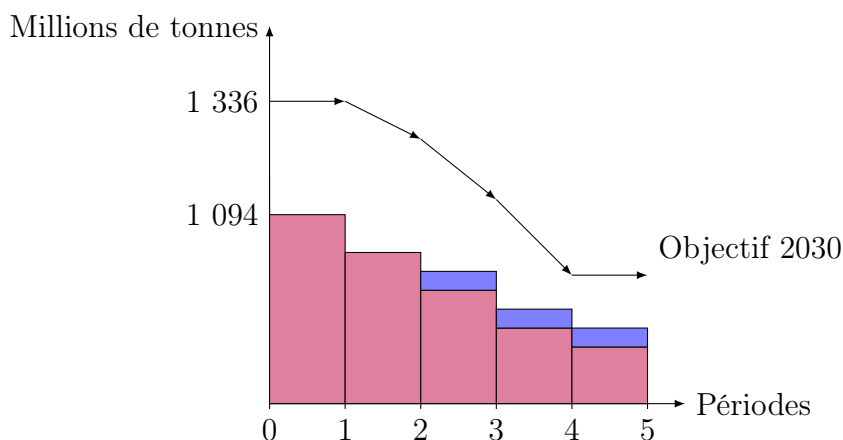


FIGURE 12 Évolution des plafonds et des permis épargnés de 2013 à 2030 sans crédits compensatoires

En supposant le bon fonctionnement des crédits compensatoires nous considérerons également la place des secteurs non couverts dans l’atteinte de l’objectif commun de 2030. Ainsi, pour la période 2015-2017 et tel qu’il a été le cas avec les crédits compensatoires, l’ajout des émissions des secteurs non réglementées n’impacte pas l’atteinte des objectifs pour cette période. Il en est de même pour la période suivante. L’objectif d’émettre au maximum 1 306 Mt d’éq. CO_2 pour l’ensemble de cette période est atteint. Pour les périodes futures, nous procéderons comme lorsque nous incluons les crédits compensatoires. Dans ce cas-ci, ce n’est qu’à partir de la période 2024-2026 que les émissions non réglementées représenteront un problème. En effet, les émissions dépasseront le plafond à partir de cette période, ce qui nuira à l’atteinte de l’objectif.

CONCLUSION

Le SPEDE est un programme qui a été mis en place par les gouvernements québécois et californien et qui a permis la réduction des secteurs couverts par ce système. Cependant, malgré la réduction des émissions de ces secteurs, au premier abord les données semblent indiquer que le système n'est pas suffisamment contraignant et ne permet pas l'atteinte des objectifs fixés par les deux juridictions. Dans ce mémoire, nous avons donc décidé de prendre en compte le rôle des crédits compensatoires étrangers, mais également l'importance des échanges de permis inter-juridictionnels dans l'atteinte des objectifs de réduction des GES.

Pour ce faire, nous avons construit un modèle, et à l'aide de ce dernier nous comprenons que le SPEDE est bel et bien un système contraignant pour les émetteurs.

Tout d'abord, en analysant le programme conjointement, nous constatons que la prise en compte des flux d'échanges entre les juridictions et des crédits compensatoires étrangers a permis l'atteinte de l'objectif conjoint pour l'année 2020.

Cependant, le fait que le système soit contraignant n'implique pas nécessairement qu'il permettra l'atteinte des objectifs fixés par les juridictions pour les années futures. En effet, les cibles fixées par les juridictions comprennent également les émissions non régulées. Les émissions des secteurs non couverts connaissent une augmentation au cours des dernières années. Ainsi, selon nos résultats, l'augmentation des émissions dans les secteurs non couverts causera des problèmes quant à l'atteinte des objectifs futurs.

En supposant que les crédits compensatoires sont bels et bien efficaces, les émis-

sions dépasseront l'objectif conjoint au cours de la période 2024-2026.

Ainsi, le SPEDE semble être un système performant permettant l'atteinte des objectifs conjoints. Cependant, à terme l'augmentation des émissions des secteurs non couverts causera un problème quant à l'atteinte des objectifs futurs. Afin de pallier ce problème, il serait judicieux de réglementer davantage les secteurs non couverts.

Enfin, les données que nous utilisons pour effectuer la projection pour les années futures ne se limitent malheureusement qu'à 2020, car les données pour 2021 ne sont pas encore disponibles. Dans des travaux futurs, il serait pertinent d'analyser l'évolution de ce système dans un contexte post-covid afin d'analyser l'effet de la pandémie et des politiques associées sur les émissions lors de cette période.

5 Annexe

5.1 Tableaux

Années	Plafonds d'émissions Québec	Plafonds d'émissions Californie	Plafonds d'émissions totaux
2013	23 200 000	162 800 000	186 000 000
2014	23 200 000	159 700 000	182 900 000
2015	65 300 000	394 500 000	459 800 000
2016	63 190 000	382 400 000	445 590 000
2017	61 080 000	370 400 000	431 480 000
2018	58 960 000	358 300 000	417 260 000
2019	56 850 000	346 300 000	403 150 000
2020	54 740 000	334 200 000	388 940 000
2021	55 260 000	320 800 000	376 060 000
2022	54 020 000	307 500 000	361 520 000
2023	52 790 000	294 100 000	346 890 000
2024	51 550 000	280 700 000	332 250 000
2025	50 310 000	267 400 000	317 710 000
2026	49 080 000	254 000 000	303 080 000
2027	47 840 000	240 600 000	288 440 000
2028	46 610 000	227 300 000	273 910 000
2029	45 370 000	213 900 000	259 270 000
2030	44 140 000	200 500 000	244 640 000

TABLEAU 3 Plafonds des permis pour le Québec et la Californie

Scénarios					
	λ_0	λ_1	δ_0	δ_1	Résultats
Surallocation à chaque période : $\sum_{i=1}^2 (S_t + Y_t - E_t^{BAU}) > 0$	=0	=0	=0	=0	Positif
Surallocation globale : $\sum_{t=0}^2 (S_t + Y_t + E_t^{BAU}) \geq 0$	=0	=0	=0	=0	Positif
	=0	>0	=0	>0	Négatif
	>0	=0	>0	=0	Positif
Contraignant à chaque période : $S_t + Y_t - E_t^{BAU} < 0$	>0	>0	>0	>0	Positif
Contraignant globalement : $\sum_{t=0}^2 (S_t + Y_t - E_t^{BAU}) < 0$	>0	>0	>0	>0	Positif
	>0	=0	>0	=0	Positif

TABLEAU 4 Synthèse de l'analyse théorique

Période de conformité	Plafond commun	Plafond commun pessimiste	Unités millésimés (crédits remis par les entreprises) QC+CA	Crédits compensatoires CA+QC
Période 1 (2013-2014)	368 900 000	385 512 000	315 362 579	12 798 167
Période 2 (2015 - 2017)	1 336 870 000	1 397 927 600	1 094 869 743	68 806 023
Période 3 (2018 - 2020)	1 209 350 000	1 306 098 000	1 024 466 103	76 886 203
Période 4 (2021 - 2023)	1 084 470 000	1 134 331 600	911 306 905	49 861 600
Période 5 (2024 - 2026)	953 040 000	997 199 200	800 863 032	44 159 200
Période 6 (2027 - 2029)	821 620 000	860 077 600	690 427 563	38 457 600

TABLEAU 5 Plafonds communs, permis, crédits compensatoires rapportés et estimés

5.2 Démonstrations mathématiques

— Démonstration mathématique pour X

$$\ln(b_{2,CA})X = e_{CA,2012}^t \quad (34)$$

En fixant $b_{2,CA}$ à 0,005, on a :

$$\ln(0,005)X = e_{CA,2012}^t \quad (35)$$

À partir des données dont nous disposons, $e_{CA,2012}^t = 6,2344$, alors :

$$X = \frac{6,2344}{\ln(0,005)} \quad (36)$$

$$X = -1,1767 \quad (37)$$

— Démonstration mathématique pour $b_{2,QC}$

$$\ln(b_{2,QC})X = e_{QC,2012}^t \quad (38)$$

En fixant $b_{2,CA}$ à 0,005 et X à -1,1767 selon les résultats obtenus à partir des données de la Californie, on a :

$$\ln(b_{2,QC})(-1,1767) = e_{QC,2012}^t$$

$$\ln(b_{2,QC}) = \frac{e_{QC,2012}^t}{(-1,1767)}$$

À partir des données dont nous disposons, $e_{QC,2012}^t = 4,3805$, alors :

$$\ln(b_{2,QC}) = \frac{4,3805}{(-1,1767)}$$

$$\exp(\ln(b_{2,QC})) = \exp\left(\frac{4,3805}{(-1,1767)}\right)$$

$$b_{2,QC} = 0,0242$$

— Démonstration pour le bénéfice agrégé (B) :

$$\text{Soit } B'_{CA} = b_{1,CA} - b_{2,CA}e_{CA,t} \text{ et } B'_{QC} = b_{1,QC} - b_{2,QC}e_{QC,t}.$$

Inversons premièrement chacune des équations afin d'isoler le terme représentant les émissions :

$$e_{CA,t} = \frac{(b_{1,CA} - B'_{CA})}{b_{2,CA}}$$

$$e_{QC,t} = \frac{(b_{1,QC} - B'_{QC})}{b_{2,QC}}$$

En additionnant ces deux équations, nous avons :

$$e_{CA,t} + e_{QC,t} = \frac{(b_{1,CA} - B')}{b_{2,CA}} + \frac{(b_{1,QC} - B')}{b_{2,QC}}$$

$$E_t = \frac{(b_{1,CA} - B')}{b_{2,CA}} + \frac{(b_{1,QC} - B')}{b_{2,QC}}$$

$$E_t = \frac{b_{2,CA}(b_{1,QC} - B') + b_{2,QC}(b_{1,CA} - B')}{b_{2,QC}b_{2,CA}}$$

$$E_t = \frac{b_{2,CA}b_{1,QC} - b_{2,CA}B' + b_{2,QC}b_{1,CA} - b_{2,QC}B'}{b_{2,QC}b_{2,CA}}$$

$$E_t = \frac{b_{2,CA}b_{1,QC} - B'(b_{2,CA} + b_{2,QC}) + b_{2,QC}b_{1,CA}}{b_{2,QC}b_{2,CA}}$$

En isolant le terme des bénéfices, on a :

$$E_t(b_{2,QC}b_{2,CA}) = b_{2,CA}b_{1,QC} - B'(b_{2,CA} + b_{2,QC}) + b_{2,QC}b_{1,CA}$$

$$B'(b_{2,CA} + b_{2,QC}) = b_{2,CA}b_{1,QC} + b_{2,QC}b_{1,CA} - E_t(b_{2,QC}b_{2,CA})$$

$$B' = \frac{b_{2,CA}b_{1,QC} + b_{2,QC}b_{1,CA} - E_t(b_{2,QC}b_{2,CA})}{b_{2,CA} + b_{2,QC}}$$

RÉFÉRENCES

- Anderson, B. et Di Maria, C. (2011). Abatement and allocation in the pilot phase of the eu ets. *Environmental and Resource Economics*, 48, 83–103.
- Badgley, G., Freeman, J., Hamman, J. J., Haya, B., Trugman, A. T., Anderegg, W. R. L. et Cullenward, D. (2022). Systematic over-crediting in California’s forest carbon offsets program. 28(4), 1433–1445. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.15943>. Récupéré le 2023-09-17 de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.15943>
- Borenstein, S., Bushnell, J. et Wolak, F. (2017). California’s cap-and-trade market through 2030 : A preliminary supply/demand analysis. *Energy Institute at Haas working paper*, 281.
- Burtraw, D., Palmer, K. L., Munnings, C., Weber, P. et Woerman, M. (2013). Linking by degrees : Incremental alignment of cap-and-trade markets. *Resources for the Future DP*, 13–04.
- Coutu, E. (2016). Incertitude des taux de change dans le système de plafonnement et d’échange avec bornes de prix : Le cas du marché du carbone entre la californie et le québec.
- Cullenward, D., Inman, M. et Mastrandrea, M. D. (2019). Tracking banking in the western climate initiative cap-and-trade program. *Environmental Research Letters*, 14(12), 124037.
- de l’Environnement de la Lutte contre les changements climatiques de la Faune et des Parcs, M. (2022). Nos cibles de réductions d’émissions de ges.

- Doda, B. et Taschini, L. (2017). Carbon dating : When is it beneficial to link etss? *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 4(3), 701–730.
- Ellerman, A. D. et Buchner, B. K. (2008). Over-allocation or abatement? a preliminary analysis of the eu ets based on the 2005–06 emissions data. *Environmental and resource economics*, 41, 267–287.
- et Changement climatique Canada, E. (2022). Rapport d’inventaire national : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada. Récupéré de <http://www.canada.ca/inventaire-ges>
- Fell, H. et Morgenstern, R. D. (2010). Alternative approaches to cost containment in a cap-and-trade system. *Environmental and Resource Economics*, 47, 275–297.
- IPCC (2022). Summary for policymakers. Dans P. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourda, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, et J. Malley (dir.). *Climate Change 2022 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, UK and New York, NY, USA. Cambridge University Press. <http://dx.doi.org/10.1017/9781009157926.001>
- Klemick, H. (2012). *What is the Optimal Offsets Discount under a Second-Best Cap & Trade Policy?* Rapport technique.
- Martin, N. et Pineau, P.-O. (2022). Overallocation in the California Québec Carbon Market : A Useless Cap Until 2030.
- Rubin, J. D. (1996). A model of intertemporal emission trading, banking, and

- borrowing. *Journal of environmental economics and management*, 31(3), 269–286.
- Schatzki, T. et Stavins, R. N. (2018). Key issues facing california’s ghg cap-and-trade system for 2021-2030.
- Schmalensee, R. et Stavins, R. N. (2017). Lessons learned from three decades of experience with cap and trade. *Review of Environmental Economics and Policy*.
- Slechten, A. (2013). Intertemporal links in cap-and-trade schemes. *Journal of Environmental Economics and Management*, 66(2), 319–336.