



CIRANO

Allier savoir et décision

Tarification optimale du gaz carbonique et élasticités dans les transports

ALEXANDRE PAVLOV

CHARLES VAILLANCOURT

SUPERVISEUR DE RECHERCHE

MICHEL POITEVIN

2020RP-20
RAPPORT DE PROJET

RP

Les rapports de projet sont destinés plus spécifiquement aux partenaires et à un public informé. Ils ne sont ni écrits à des fins de publication dans des revues scientifiques ni destinés à un public spécialisé, mais constituent un médium d'échange entre le monde de la recherche et le monde de la pratique.

Project Reports are specifically targeted to our partners and an informed readership. They are not destined for publication in academic journals nor aimed at a specialized readership, but are rather conceived as a medium of exchange between the research and practice worlds.

Le CIRANO est un organisme sans but lucratif constitué en vertu de la Loi des compagnies du Québec. Le financement de son infrastructure et de ses activités de recherche provient des cotisations de ses organisations-membres, d'une subvention d'infrastructure du gouvernement du Québec, de même que des subventions et mandats obtenus par ses équipes de recherche.

CIRANO is a private non-profit organization incorporated under the Quebec Companies Act. Its infrastructure and research activities are funded through fees paid by member organizations, an infrastructure grant from the government of Quebec, and grants and research mandates obtained by its research teams.

Les partenaires du CIRANO – CIRANO Partners

Partenaires corporatifs – Corporate Partners

Autorité des marchés financiers
Banque de développement du Canada
Banque du Canada
Banque nationale du Canada
Bell Canada
BMO Groupe financier
Caisse de dépôt et placement du Québec
Énergir
Hydro-Québec
Innovation, Sciences et Développement économique Canada
Intact Corporation Financière
Investissements PSP
Manuvie Canada
Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation
Ministère des finances du Québec
Mouvement Desjardins
Power Corporation du Canada
Rio Tinto
Ville de Montréal

Partenaires universitaires – Academic Partners

École de technologie supérieure
École nationale d'administration publique
HEC Montréal
Institut national de la recherche scientifique
Polytechnique Montréal
Université Concordia
Université de Montréal
Université de Sherbrooke
Université du Québec
Université du Québec à Montréal
Université Laval
Université McGill

Le CIRANO collabore avec de nombreux centres et chaires de recherche universitaires dont on peut consulter la liste sur son site web. *CIRANO collaborates with many centers and university research chairs; list available on its website.*

© Août 2020. Alexandre Pavlov, Charles Vaillancourt, Michel Poitevin. Tous droits réservés. *All rights reserved.* Reproduction partielle permise avec citation du document source, incluant la notice ©. *Short sections may be quoted without explicit permission, if full credit, including © notice, is given to the source.*

Les idées et les opinions émises dans cette publication sont sous l'unique responsabilité des auteurs et ne représentent pas nécessairement les positions du CIRANO ou de ses partenaires. *The observations and viewpoints expressed in this publication are the sole responsibility of the authors; they do not necessarily represent the positions of CIRANO or its partners.*

Tarification optimale du gaz carbonique et élasticités dans les transports

Alexandre Pavlov *, *Charles Vaillancourt* †

Superviseur de recherche : Michel Poitevin ‡

Résumé

La première partie de ce rapport utilise les versions les plus récentes des modèles DICE, FUND et PAGE ainsi que cinq scénarios socioéconomiques nouvellement conçus pour estimer le coût social du carbone en 2020 à 107,79\$CA2018, précédemment évalué à 48,50\$CA2018 par le groupe de travail canadien interministériel sur le coût social des gaz à effet de serre.

La deuxième partie de ce rapport présente une revue de littérature sur les élasticités-prix dans le domaine des transports, avec un intérêt particulier pour celles de l'essence et des transports publics. La revue de la littérature est suivie d'une section empirique dans laquelle un modèle inspirée des travaux présentés plus tôt estime l'élasticité-prix de l'essence au Québec entre -0,113 et -0,125.

Mots-clés : Réduction, Émission, Prix optimal, Élasticité-prix

* Université de Montréal. alexandre.pavlov@umontreal.ca.

† Université de Montréal. charles.vaillancourt.5@umontreal.ca.

‡ Université de Montréal et CIRANO. michel.poitevin@umontreal.ca.

Remerciements

Nous remercions notre superviseur de recherche Michel Poitevin ainsi que notre partenaire de recherche le Centre interuniversitaire de recherche en analyse des organisations (CIRANO), sans qui ce projet n'aurait pas pu voir le jour. Nous remercions Vasia Panousi ainsi que les membres du Laboratoire sur la politique macroéconomique de l'Université de Montréal pour leur soutien. Nous remercions David Anthoff et Lisa Rennels qui ont répondu à nos questions sur le module Mimi sur Julia. Nous remercions Chris Hope qui a répondu à nos questions sur le modèle d'évaluation intégré PAGE. Cette recherche a reçu le soutien de Mitacs dans le cadre du programme Mitacs Accélération.

Table des matières

1	Introduction	4
2	Tarification optimale du carbone – Alexandre Pavlov	6
2.1	Une brève théorie des externalités	7
2.2	Actualisation des coûts et bénéfices	8
2.2.1	Taux d'escompte social	9
2.2.2	Règle de Ramsey	10
2.3	Modèles d'évaluation intégrée	11
2.3.1	Le modèle DICE	13
2.3.2	Le modèle FUND	15
2.3.3	Le modèle PAGE	16
2.4	Études antérieures sur le coût social du carbone	18
2.5	Paramètres des modèles d'évaluation intégrée	21
2.5.1	Taux d'escompte	21
2.5.2	Sensibilité climatique	23
2.5.3	Productivité	24
2.6	Méthodologie	27
2.6.1	Coût social du carbone	28
2.6.2	Inadéquation des politiques climatiques	29
2.7	Résultats	30
2.7.1	Coût social du carbone	30
2.7.2	Inadéquation des politiques climatiques	34
2.8	Conclusion	46
A.1	Le modèle DICE	48

A.2	Le modèle FUND	53
A.3	Le modèle PAGE	69
A.4	Tableaux	75
A.5	Graphiques	88
3	Élasticités reliées au transport – Charles Vaillancourt	113
3.1	Élasticité-prix de la demande d'essence	113
3.1.1	Estimation par régression simple	113
3.1.2	Problème de Wright et variables instrumentales	114
3.1.3	Modèle AIDS	118
3.1.4	Études utilisant le modèle AIDS	122
3.1.5	Conclusion	126
3.2	Élasticité-prix des transports publics	127
3.2.1	Conclusion	134
3.3	Estimation des élasticités au Québec	134
3.3.1	Données et méthodologie	135
3.3.2	Spécifications et interprétations	137
3.3.3	Résultats, interprétation et discussion	138
3.3.4	Conclusion	140
3.4	Conclusion	140
	Références	141

1 Introduction

Le présent rapport se divise en deux volets, le premier traitant de la théorie de la tarification optimale du carbone et le second traitant des élasticités dans les transports.

Le premier volet présente les trois principaux modèles d'estimation du coût social du carbone, soit les modèles DICE, FUND et PAGE. Après une présentation théorique de l'approche préconisée, nous détaillons les équations théoriques sous-jacentes à ces modèles. Nous utilisons ensuite ces modèles pour estimer le coût social du carbone pour différentes valeurs de paramètres d'intérêt.

Les estimations sont effectuées pour 5 sentiers socioéconomiques et un éventail de 7 taux d'escompte. Avec taux d'escompte de 3%, la moyenne du coût social du carbone moyen entre les 3 modèles et les 5 sentiers socioéconomiques est de 107,79 \$ CA 2018, ce qui est nettement supérieur à l'estimation du groupe de travail canadien de 48,50 \$ CA 2018 pour un même taux d'escompte. La moyenne du coût social du carbone moyen entre les 3 modèles dans le SSP2 est de 101,56 \$ CA 2018, de 142,95 \$ CA 2018 et de 207,39 \$ CA 2018 respectivement pour des taux d'escompte de 3%, 2,5% et 2%. On se rend compte que le coût social du carbone est très sensible au choix du taux d'escompte.

Le coût social du carbone moyen de tous les modèles pour le sentier socioéconomique moyen se situe entre 101,56 \$ CA 2018 et 207,39 \$ CA 2018, dépendant du taux d'escompte jugé approprié. Sachant que l'essence émet en moyenne 2,29 kgCO₂/L (0,00229 tCO₂/L) (Ressources naturelles Canada, 2014), l'imposition d'une tarification basée sur ces coûts sociaux du carbone équivaldrait à une surcharge de 0,23 \$/L à 0,48 \$/L. Le montant optimal d'une taxe carbone prenant en compte les contraintes politiques et fiscales et le meilleur moyen de la mettre en oeuvre sont des sujets qui dépassent le cadre de ce rapport, mais le coût social du carbone reste un point de repère utile dans l'élaboration des politiques environnementales.

Nous terminons avec une brève discussion des conséquences de sous-estimer ou de sur-estimer les dommages des changements climatique dans l'élaboration d'une politique climatique axée sur une taxe carbone. Nous trouvons que presque tous les scénarios avec politique climatique (92,8%) présentent un gain par rapport aux scénarios sans politique climatique. Nous trouvons d'ailleurs que les pertes possibles sont souvent nettement inférieures aux gains possibles et que les pertes ne sont occasionnées que lors de grandes erreurs dans les hypo-

thèses sur la croissance économique et sur la valeur de la sensibilité climatique. Finalement, la quasi-totalité des politiques climatiques résultent en un gain substantiel dès 2100 pour un coût relativement modeste supporté par les générations passées.

Le second volet s'intéresse aux élasticités dans le domaine des transports. Dans une première partie, nous nous intéressons à l'élasticité-prix de la demande d'essence. Deux grandes catégories d'études ont été réalisées pour l'estimation de l'élasticité-prix. D'abord, plusieurs études s'appuient sur des données agrégées de marché. Des défis économétriques se présentent alors lorsqu'on estime l'élasticité-prix de la demande d'essence à partir de telles données. Une identification correcte de la demande nécessite donc l'introduction de variables instrumentales. Avant de présenter une revue de la littérature empirique de ces estimations, nous examinons la nature des défis économétriques posés ainsi que leurs solutions. D'autres études s'appuient sur des données microéconomiques et estiment un système de demande. Un modèle souvent utilisé pour de telles estimations de demande est le modèle AIDS que nous décrivons en détail avant de présenter les estimations dérivées à l'aide de ce modèle. La plupart des études trouvent une élasticité-prix variant entre $-0,20$ et $-0,9$, ce qui démontre que la demande d'essence est relativement inélastique.

Dans une seconde partie, nous présentons des études qui ont estimé d'autres élasticités dans le domaine des transports telle l'élasticité reliée au prix du transport en commun. Il est difficile de comparer les différentes études étant donné la grande hétérogénéité dans les paramètres considérés et les horizons temporels étudiés. On peut affirmer tout de même que la demande de transport public est très inélastique à court terme et un peu plus élastique à long terme même si elle demeure inélastique.

Finalement, la troisième partie développe un modèle économétrique pour estimer l'élasticité-prix de l'essence au Québec et dans d'autres provinces canadiennes, en s'appuyant sur la méthodologie sur des études présentées dans la première partie. Le modèle économétrique utilisé cherche à estimer différentes élasticités-prix de court terme pour le Québec ainsi que trois autres provinces canadiennes. En ce qui a trait au Québec, l'analyse économétrique suggère que l'élasticité-prix de court terme de l'essence varie entre $-0,113$ et $-0,125$, ce qui fait de l'essence un bien très inélastique.

2 Tarification optimale du carbone – Alexandre Pavlov

Le premier volet s’inspire surtout de l’étude du groupe de travail interministériel canadien sur le coût social des gaz à effet de serre (Environnement et Changement Climatique Canada, 2016), évaluant des distributions de 100 000 valeurs du coût social du carbone des versions récentes des modèles d’évaluation intégrée DICE, FUND et PAGE. Les estimations sont effectuées pour 5 sentiers socioéconomiques et un éventail de 7 taux d’escompte. La variante stochastique du FUND et du PAGE est utilisée alors que le paramètre de sensibilité climatique du DICE est traité comme variable aléatoire. Tous les modèles sont normalisés dans l’évolution du PIB et de la population brute, le taux d’escompte utilisé, la distribution de probabilité du paramètre de sensibilité climatique et la dernière année de calcul. Une attention particulière est accordée à la moyenne, la médiane et le 95^e centile des distributions. Avec un taux d’escompte de 3%, la moyenne du coût social du carbone moyen entre les 3 modèles et les 5 sentiers socioéconomiques est de 107,79 \$ CA 2018, ce qui est nettement supérieur à l’estimation du groupe de travail de 48,50 \$ CA 2018 pour un même taux d’escompte. La moyenne du coût social du carbone moyen entre les 3 modèles dans le SSP2 est de 101,56 \$ CA 2018, de 142,95 \$ CA 2018 et de 207,39 \$ CA 2018 respectivement pour des taux d’escompte de 3%, 2,5% et 2%.

Utilisant le DICE-2016R2 pour évaluer 9025 combinaisons de politiques climatiques et associées à différentes hypothèses sur l’économie et sur la sensibilité climatique, nous terminons avec une brève discussion des conséquences de sous-estimer ou de sur-estimer les dommages des changements climatique dans l’élaboration d’une politique climatique axée sur une taxe carbone. Nous trouvons que presque tous les scénarios avec politique climatique (92,8%) présentent un gain par rapport aux scénarios sans politique climatique. Nous trouvons d’ailleurs que les pertes possibles sont souvent nettement inférieures aux gains possibles et que les pertes ne sont occasionnées que lors de grandes erreurs dans les hypothèses sur la croissance économique et sur la valeur de la sensibilité climatique. Finalement, la quasi-totalité des politiques climatiques résultent en un gain substantiel dès 2100 pour un coût relativement modeste supporté par les générations passées.

2.1 Une brève théorie des externalités

Les émissions anthropiques de gaz carbonique et la pollution en général sont des exemples classiques d'externalités, ce dernier concept formalisé au début du XX^e siècle par l'économiste Arthur Pigou dans son ouvrage séminal «The Economics of Welfare».

Dans un contexte de production de biens et services, le produit marginal net d'un facteur de production est le changement des quantités produites par un procédé de production à la suite de l'addition ou de la soustraction d'une unité d'un facteur de production du procédé de production, toutes choses étant égales par ailleurs. Pigou distingue ce qu'il appelle le produit marginal net social de la production du produit marginal net privé de la production, ce premier étant obtenu par tous les agents de l'économie et ce dernier étant obtenu uniquement par ceux ayant (dés)investi les facteurs de production concernés. Si l'addition ou la soustraction d'une unité du facteur de production d'un procédé de production n'affecte pas les quantités produites par les autres procédés de production de l'économie alors qu'aucune transaction entre les agents concernés n'a eu lieu, le produit marginal net social et le produit marginal privé sont égaux. Autrement, ils divergent et il y a externalité (Pigou, 1932).

Lorsque le produit marginal net privé de la production et le produit marginal net social de la production sont identiques, ceci mène à un niveau de production optimal. Sinon, un niveau de production suboptimal est atteint puisque les producteurs ne prennent en compte que le produit marginal net privé de la production dans leurs décisions d'investissement. Plus précisément, un produit marginal net privé supérieur au produit marginal net social indique une externalité négative et un produit marginal net privé inférieur au produit marginal net social indique une externalité positive. Un surinvestissement a lieu dans le premier cas et un sousinvestissement a lieu dans le second cas. Afin de corriger cet échec du marché, Pigou propose l'imposition d'une taxe aux producteurs d'externalités négatives et l'offre d'une subvention aux producteurs d'externalités positives (Pigou, 1932).

Plus largement, une externalité survient lorsque les actions d'un agent affectent d'autres agents sans que ceux-ci ne transigent entre eux à cet effet (Nicholson et Snyder, 2012). Ainsi, une externalité peut être générée tant par un procédé de production que par un individu et peut affecter tant la productivité d'un procédé de production que le bien-être d'un individu. On peut montrer que, sous hypothèse de compétition pure et parfaite dans les marchés, le prix socialement optimal d'un bien, service ou action générant une externalité est égal au coût social marginal de l'externalité, c'est-à-dire à la somme du coût marginal de la production du

bien, service ou action générant l'externalité supporté par le producteur de l'externalité et de la valeur monétaire de l'externalité marginale subie par autrui. Si cette égalité est violée, on peut atteindre un niveau de production socialement optimal en taxant ou subventionnant le producteur de l'externalité jusqu'à l'atteinte de ce prix socialement optimal (Baumol, 1972).

Dans le cas des émissions de gaz carbonique, l'entreprise ou l'individu contribuent aux changements climatiques et imposent alors des coûts au reste de l'humanité. Par exemple, une usine canadienne ou un automobiliste canadien produisent du gaz carbonique qui peut contribuer à exacerber une canicule induisant des troubles cardiorespiratoires à des aînés canadiens, ou exacerber une tempête tropicale menant à la destruction des récoltes d'agricultures brésiliens.

Les émissions de gaz carbonique sont un type particulier d'externalité qui est généré par les agents de toutes nationalités et qui affecte par ailleurs aussi les agents de toutes nationalités. Cette externalité est intergénérationnelle en plus d'être internationale, certains phénomènes climatiques persistant pendant des décennies, voire des siècles et des millénaires. Ce problème exige donc des solutions issues d'une perspective globale tournée vers l'avenir. Ceci pose plusieurs difficultés, notamment dans la détermination du *coût social du gaz carbonique*, le coût qu'une unité d'émission de gaz carbonique inflige à la société.

1. Les émissions futures de gaz carbonique dépendent de facteurs incertains comme l'évolution de l'économie, de la technologie et de la démographie.
2. Les effets des émissions de gaz carbonique sur les changements climatiques ne sont pas parfaitement connus.
3. Les effets des changements climatiques sur l'économie ne sont pas parfaitement connus.
4. Les effets des changements climatiques sont souvent non-monétaires.
5. L'actualisation des coûts dans le temps crée des défis tant techniques (structure des taux d'escompte) qu'éthiques (équité intergénérationnelle).

2.2 Actualisation des coûts et bénéfices

Quand les coûts et les bénéfices d'un projet s'écoulent dans le temps plutôt qu'être encourus et reçus en leur totalité dans l'immédiat, il est nécessaire de se questionner sur le moyen le plus approprié de les agréger. Les politiques environnementales étant susceptibles d'affecter des individus dans le futur lointain, la question d'actualisation des coûts et bénéfices est

d'autant plus importante.

2.2.1 Taux d'escompte social

Une manière d'évaluer un projet est de calculer sa valeur actuelle nette, c'est-à-dire la somme pondérée de la différence entre ses coûts et ses bénéfices à chaque période.

$$\begin{aligned} VAN &= B_0 - C_0 + \frac{B_1 - C_1}{(1+r)} + \frac{B_2 - C_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{B_T - C_T}{(1+r)^T} \\ &= \sum_{t=0}^T \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} \end{aligned}$$

Ci-haut, r est le *taux d'escompte*. Le projet est acceptable si sa valeur actuelle nette est positive, ce qui n'est pas assuré si les coûts dépassent les bénéfices à certaines périodes (Just et al., 2004). Ceci est le cas des politiques sur le climat, où les années initiales sont caractérisées par des investissements dont les dividendes ne sont collectés que plus tard dans le futur sous la forme de réduction des impacts climatiques. La désirabilité d'une politique sur le climat est alors sensible au taux d'escompte utilisé pour l'évaluer.

Dans un marché parfait du capital, c'est-à-dire sans coûts de transaction et limites à l'emprunt, le taux d'escompte d'un projet sans risque doit être égal au taux d'intérêt sans risque de l'économie. En effet, si le taux d'escompte d'un projet d'une certaine maturité était inférieur à une obligation de même maturité, il serait dans le meilleur intérêt des générations futures d'investir dans cette obligation. Ainsi, le plus petit taux d'escompte compatible avec la théorie économique est le taux d'intérêt sans risque de l'économie lié à un investissement sans risque de même échéance (Gollier, 2011).

Le taux d'intérêt sans risque en vigueur sur le marché peut servir de guide pour choisir le taux d'escompte le plus approprié pour l'évaluation des projets, le *taux d'escompte socialement efficient*, mais les longs horizons des politiques climatiques empêchent de prendre ce raccourci. D'abord, même les gouvernements les plus sûrs ont des risques d'inflation et de défaut dans le très long terme, rendant les obligations gouvernementales de très long terme des représentations imparfaites d'outils financiers sans risque. En outre, les obligations gouvernementales aux maturités s'approchant des horizons impliqués dans les politiques sur le climat n'existent pas et leurs taux d'intérêt ne peuvent donc pas être observés sur les marchés financiers.

Finalement, les marchés financiers sont inefficaces puisque les générations futures ne peuvent pas transiger avec les générations présentes (Gollier, 2011). Ces obstacles peuvent être en partie surmontés par l'utilisation d'un modèle déterminant le taux d'escompte socialement efficient tel que le modèle néoclassique de croissance de Ramsey.

2.2.2 Règle de Ramsey

Le modèle de Ramsey d'où provient la règle de Ramsey est un modèle de croissance néoclassique avec épargne endogène qui sert de base aux modèles étudiés plus tard dans cette étude. Avant d'énoncer la règle de Ramsey, définissons d'abord la fonction d'utilité isoélastique individuelle.

$$u(c) = \frac{c^{1-\gamma}}{1-\gamma}$$

L'utilité de cet agent est donc fonction du niveau de consommation c et du niveau d'aversion relative au risque γ dont la valeur diffère de 1 ($u(c) = \ln(c)$ si $\gamma = 1$). Cette fonction d'utilité est croissante et concave, indiquant que l'individu préfère toujours consommer plus, mais valorise moins une unité de consommation supplémentaire plus il consomme. Elle est aussi additive dans le temps, permettant à l'individu d'évaluer son bien-être intertemporel en sommant son utilité présente et les utilités futures espérées.

Supposons un projet quelconque dont chaque unité d'investissement rapporte e^{rt} dans le futur, avec r le taux de rendement du projet. Si l'individu investit un petit montant ϵ , son utilité intertemporelle change ainsi, avec U_0 la dérivée partielle de l'utilité intertemporelle sur la consommation présente et U_t la dérivée partielle de l'utilité intertemporelle sur la consommation future. Si chaque unité de capital rapporte e^{rt} dans le futur, cette relation devient

$$\Delta U(c_0, c_t) = -\epsilon U_0(c_0, c_t) + \epsilon e^{rt} U_t(c_0, c_t).$$

Le taux de rendement minimal pour que le projet soit désirable, ou le *taux d'escompte social optimal*, est tel que le changement d'utilité intertemporelle est nul après un changement d'utilité à une période et un changement d'utilité opposé à une période future. En d'autres mots, il est tel que le changement d'utilité présent est compensé par le changement d'utilité futur. Ceci implique la relation suivante.

$$e^{rt} = \frac{U_0(c_0, c_t)}{U_t(c_0, c_t)}$$

On peut isoler le taux d'escompte en utilisant les propriétés des logarithmes.

$$r = \frac{1}{t} \ln \left[\frac{U_0(c_0, c_t)}{U_t(c_0, c_t)} \right]$$

Si l'individu est impatient et préfère l'utilité présente à l'utilité future, il pondère les utilités futures par un *facteur d'escompte* égal à $e^{-\delta t}$, où δ est le *taux de préférence pour le présent*. Il évalue alors son utilité intertemporelle ainsi.

$$U(c_0, c_t) = u(c_0) + e^{-\delta t} u(c_t)$$

Le degré de concavité de la fonction d'utilité intertemporelle représente la préférence pour le lissage intertemporel de la consommation, *l'aversion relative à l'inégalité intertemporelle*.

$$R(c) = -\frac{c u''(c)}{u'(c)} = \gamma$$

Le taux d'escompte est alors comme suit.

$$r = \frac{1}{t} \ln \left[\frac{u'(c_0)}{e^{-\delta t} u'(c_t)} \right] = \delta - \frac{1}{t} \ln \left[\frac{u'(c_t)}{u'(c_0)} \right]$$

Une approximation de Taylor de $u'(c_t)$ autour de c_0 donne la *règle de Ramsey*.

$$r = \delta + \gamma g$$

Ci-haut, g est le taux de croissance de la consommation entre les périodes 0 et t . Le taux d'escompte dépend ici de la croissance de la consommation ainsi que du taux de préférence pour le présent δ et de l'aversion relative à l'inégalité intertemporelle γ . Ainsi, des agents qui s'attendent à une future expansion économique sont réticents à substituer la consommation présente pour la consommation future. Dans un contexte de transferts générationnels, qui est celui des politiques sur le climat, il y aura moins d'acceptabilité à sacrifier la consommation présente pour améliorer le bien-être de générations futures bien nanties (Gollier, 2011).

2.3 Modèles d'évaluation intégrée

L'estimation du coût social du gaz carbonique peut s'effectuer avec des modèles d'équilibre général ou avec des modèles d'évaluation intégrée. Cette étude se penche sur ces derniers types de modèles qui intègrent des équations des sciences naturelles aux équations des sciences économiques dans un cadre unifié. Ces modèles procèdent en estimant les émissions

futures, en évaluant les changements climatiques induits par celles-ci, puis en évaluant les impacts environnementaux de ces changements climatiques et les impacts économiques induits par ces impacts environnementaux et finalement en évaluant l'effet marginal de modifier les émissions d'un gaz à effet de serre sur l'économie (coût social du gaz à effet de serre).

On se concentre sur trois modèles à source ouverte qui ont gagné de la crédibilité au fil de plus de 20 ans de révisions prenant en compte les critiques des pairs et les avancées des connaissances dans les sciences économiques et les sciences de la Terre :

1. *Dynamic Integrated Climate-Economy* (DICE) ;
2. *Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution* (FUND) ;
3. *Policy Analysis of the Greenhouse Effect* (PAGE).

Ces modèles ont des particularités qui les distinguent les uns des autres et les rendent intéressants à comparer. Une description détaillée du DICE et du FUND ainsi qu'une description sommaire du PAGE est présentée dans les sections suivantes. Le tableau ci-dessous résume quelques unes des différences entre les modèles.

Tableau 1 – Différences entre le DICE, le FUND et le PAGE

	DICE	FUND	PAGE
Régions	1	16	8
Stochastique	Non	Oui	Oui
Production endogène	Oui	Non	Non
Population endogène	Non	Oui	Non
Politique climatique	Taxe	Taxe	Adaptation
Fonctions de dommage	1	15	4
Gaz à effet de serre	1	5	5

Le modèle DICE est le plus simple et le modèle PAGE est le plus complexe des trois. Cependant, il n'y a pas d'unanimité sur le modèle le plus approprié à utiliser. DICE est essentiellement un modèle néoclassique de croissance de Ramsey sur lequel est greffée une composante climatique avec des équations hautement stylisées des émissions et des dommages climatiques. Par contraste, FUND et PAGE comportent de nombreuses équations détaillées

représentant différents aspects des émissions et des dommages climatiques. Des modèles comme DICE ont l'avantage d'être relativement faciles à comprendre alors que des modèles comme FUND et PAGE ont l'avantage d'être plus modulaires.

2.3.1 Le modèle DICE

Publié pour la première fois en 1992 par Nordhaus (Nordhaus, 2018a), le modèle DICE est passé par de nombreuses itérations jusqu'à atteindre sa forme actuelle en 2019 qui est le DICE-2016R3 (Nordhaus, 2019). Cette étude utilise une version antérieure du modèle, le modèle DICE-2016R1 publié en 2016 (Nordhaus, 2017), puisque nous n'avons pas accès aux spécificités des révisions DICE-2016R2 et DICE-2016R3. Bien qu'aucun document exhaustif décrivant le modèle DICE-2016R1 n'existe, un document technique pour le modèle DICE-2013R est disponible (Nordhaus et Sztorc, 2013). Nous utilisons celui-ci en conjonction avec son code GAMS publié sur le site de Nordhaus (Nordhaus, 2016) et avec le papier présentant les résultats du DICE-2016R1 (Nordhaus, 2017) pour décrire le modèle utilisé. Afin de mieux illustrer les liens entre les équations du modèle, le graphique 7 contenant un schéma simplifié du modèle DICE-2016R1 est ajouté dans l'annexe A.5. La description qui suit est à peu près conforme à une lecture du schéma du bas vers le haut. Une flèche liant une équation à une autre signifie que le résultat d'une équation entre comme variable dans une autre équation. Une flèche bidirectionnelle indique que cette relation est bidirectionnelle. Une description plus détaillée du modèle est présente dans l'annexe A.1.

Le modèle DICE-2016R1 utilise comme base le modèle néoclassique de croissance de Ramsey, l'étendant avec l'investissement climatique. Dans ce modèle, les économies investissent dans l'accroissement du capital pour augmenter la production future et dans le décroissement des émissions pour réduire les dommages des changements climatiques à la production future. Ce modèle a 100 périodes de 5 ans, débutant en 2015 et se terminant en 2510. Le niveau de population est calibré pour suivre les projections démographiques de l'ONU alors que le taux d'épargne est exogène et préalablement optimisé pour maximiser la fonction objectif qui est une fonction d'utilité sociale utilitariste intertemporelle pour toutes les générations de tous les pays confondus. Le taux de productivité des facteurs entrant dans la fonction de production croît de manière exogène de moins en moins rapidement dans le temps, supposant un ralentissement à long terme dans la croissance du progrès technologique. La société peut réduire les émissions à un certain coût qui est fonction du coût des technologies alternatives

qui permettent de produire de l'énergie sans ressources fossiles évoluant de manière exogène ainsi que d'une variable de contrôle du taux de réduction des émissions s'exprimant en pourcentage de réduction. Le taux de réduction des émissions est d'au plus 100% jusqu'en 2155, après quoi la séquestration du gaz carbonique à grande échelle permet de l'augmenter jusqu'à 120%. Le coût de réduction des émissions est calibré sur les fonctions de coûts des modèles d'évaluation intégrée analysés dans une étude de Gillingham et al. (Gillingham et al., 2015) comparant différents modèles d'évaluation intégrée pour déceler les sources principales des déviations dans leurs résultats.

Les dommages climatiques sont déterminés par une équation dépendant de la croissance de la température atmosphérique depuis 1900 calibrée sur une moyenne pondérée des estimations des dommages climatiques de 26 études, les poids déterminés par la recense et la crédibilité des études, plus un ajustement de 25% conçu pour compenser l'absence de certains types de dommages climatiques dans ces études.

L'accroissement de température atmosphérique depuis 1900 et l'accroissement de température océanique depuis 1900 sont interdépendants. La température atmosphérique et la température océanique dépendent du niveau du forçage radiatif, qui est la différence entre l'énergie solaire reçue et émise. Le forçage radiatif est lui-même fonction de la concentration atmosphérique de CO₂ endogène au modèle ainsi que du forçage radiatif exogène causé par d'autres gaz à effet de serre. La concentration de CO₂ dans l'atmosphère, la concentration de CO₂ dans la biosphère et la surface des océans et la concentration de CO₂ dans l'océan profond sont interdépendants. Le CO₂ se déplace en effet d'un milieu à l'autre à une vitesse prédéterminée. Le tout dépend des émissions endogènes de CO₂. Les équations de température, de forçage radiatif et de concentration de CO₂ dans le modèle DICE sont calibrées sur des études récentes inférant des tendances sur des observations passées et sur des études récentes utilisant des simulations climatiques. Les émissions de CO₂ sont la somme des émissions industrielles endogènes ainsi que des émissions dues à l'utilisation des terres exogènes. Les émissions industrielles dépendent d'un ratio production-émission qui baisse dans le temps pour représenter les tendances générales de décarbonisation des économies mondiales ainsi que du taux de réduction des émissions et de la production brute.

2.3.2 Le modèle FUND

Le modèle FUND a été créé par Tol afin d'étudier les interactions stratégiques entre les régions du monde dans leurs politiques climatiques. Sa version la plus récente dénotée FUND 3.9 date de 2014. FUND est un modèle à 16 régions (tableau 16 annexe A.4 et graphique 9 annexe A.5) produisant des valeurs pour chaque année de 1950 à 3000. FUND opère sous l'hypothèse que le niveau de production par habitant et la croissance de la population atteignent un plateau peu après 2300 qui se maintient jusqu'à l'an 3000. Nous nous appuyons sur la description technique (Anthoff et Tol, 2014) ainsi que sur le code Julia du FUND 3.9 dans notre description du modèle. Le graphique 8 de l'annexe A.5 contient un schéma simplifié du modèle. La lecture du schéma s'effectue similairement à celle du modèle DICE-2016R1. Étant donné la complexité du FUND, certaines parties du modèle sont décrites brièvement. Une présentation plus compréhensive est donnée dans l'annexe A.2.

Contrairement au DICE présenté dans la section précédente, la production brute du FUND croît à un taux exogène. Toutefois, la production nette est modifiée par les coûts d'abattement des gaz à effet de serre et les coûts des dommages climatiques causés par les changements climatiques. La population brute du FUND croît aussi à un taux exogène, mais est affectée par les changements climatiques contrairement à celle du DICE. En effet, la population nette d'une région est réduite par la mortalité et l'émigration induites par les changements climatiques et agrandie par l'immigration provenant des régions affectées par les changements climatiques. Alors que le modèle précédent contient une unique fonction de dommages climatiques calibrée sur une série d'études, FUND contient une quinzaine de fonctions de dommages climatiques pour différents secteurs de l'économie. Celles-ci sont séparées en fonctions de dommages économiques (changements dans la valeur des ressources hydriques, changements dans le surplus social de l'industrie forestière, changements dans les dépenses de chauffage, changements dans les dépenses de climatisation, changements dans la production agricole, changements dans la valeur des terres sèches, coûts de la protection des terres contre la montée du niveau des mers, coûts des réfugiés climatiques, dommages monétaires des tempêtes tropicales, dommages monétaires des tempêtes extratropicales, autres dommages économiques) et fonctions de dommages hors-marché (changements dans la valeur des écosystèmes, valorisation des décès et maladies, changements dans la valeur des terres humides, coûts de l'émigration, autres dommages hors-marché). Finalement, ce modèle endogénise quatre gaz à effet de serre, en l'occurrence le gaz carbonique (CO_2), l'oxyde nitreux (N_2O), le méthane (CH_4) et l'hexafluorure de soufre (SF_6) et prend en compte le dioxyde

de soufre (SO_2) de manière exogène. Une autre des particularités du FUND est sa prise en compte de l'effet fertilisant du CO_2 qui agit pour réduire le coût social du carbone. Le modèle considère donc la possibilité que certaines régions atteignent des températures et concentration atmosphérique en CO_2 optimales pour la croissance des produits agricoles.

Les équations de température du modèle FUND sont calibrés sur une étude de Mendelsohn et al. (Mendelsohn et al., 2000) comparant les impacts des changements climatiques estimés par 14 modèles climatiques. Le forçage radiatif influençant la température dépend de la concentration de CO_2 , de CH_4 , de N_2O , de SF_6 et de SO_2 dans l'atmosphère. L'équation du forçage radiatif du FUND est calibrée sur les études de Ramaswamy et al. (Ramaswamy et al., 2001) et de Forster et al. (Forster et al., 2007) sur le forçage radiatif. La température agit sur le niveau des mers dans le modèle, ce dernier pouvant potentiellement réduire la quantité des terres secs et humides dans une région. La concentration atmosphérique de CO_2 suit un modèle à cinq boîtes prenant inspiration des études de Maier-Reimer et Hasselmann (Maier-Reimer et Hasselmann, 1987) et de Hammitt et al. (Hammitt et al., 1992) sur le cycle du carbone. Ce modèle est exprimé par une équation où les émissions sont allouées en cinq parts différentes dans des "boîtes" qui dissipent le CO_2 à des taux différents. Les émissions de CO_2 sont la somme des émissions de la biosphère et des émissions humaines endogènes ainsi que des émissions humaines dues à l'utilisation des terres exogènes de toutes les régions.

Le modèle FUND a un paramètre de politique de réduction des émissions qui affecte les émissions et les coûts de mitigation qui dépend des émissions humaines endogènes, du stock régional et mondial dans la connaissance en matière de mitigation des émissions et du PIB régional.

2.3.3 Le modèle PAGE

Publié en 2019, le modèle PAGE-ICE (Policy Analysis of the Greenhouse Effect, Ice, Climate, Economics) est la version la plus à jour du modèle PAGE. Par souci de clarté et de concision, nous nous limitons à sommairement décrire le modèle à l'aide de la documentation technique du PAGE09 (Hope, 2011) et du PAGE-ICE (Yumashev, 2019) ainsi qu'à l'aide du code Julia de PAGE-ICE disponible sur GitHub. Une version légèrement plus détaillée de l'exposé est présente dans l'annexe A.3.

PAGE est un modèle stochastique à 8 régions (tableau 17 de l'annexe A.4 et graphique 10 de l'annexe A.5), à plus de 160 variables et paramètres incertains décrits par des dis-

tributions de probabilité évaluant les impacts des changements climatiques causés par les émissions de trois gaz à effet de serre (gaz carbonique, méthane et oxyde nitreux) et de trois catégories de gaz à effet de serre (gaz à effets linéaires, aérosols sulfatés et autres). PAGE considère l'augmentation du forçage radiatif dû à la réduction de l'albedo de la surface terrestre causée par la fonte des glaces. Le modèle prend aussi en compte le gaz carbonique libéré par la fonte du pergélisol à l'aide d'une moyenne des émissions projetées par les modèles SiBCASA (Simple Biosphere Carnegie-Ames-Stanford Approach) et JULES (Joint UK Land Environment Simulator). Les impacts s'expriment en pourcentage de la production d'une région et sont divisés en impacts de marché, impacts hors-marché, impacts de la montée du niveau des mers et impacts des discontinuités climatiques. Ce dernier type d'impact dont la présence est déterminée de manière aléatoire est unique au PAGE parmi les trois modèles. Contrairement au DICE et au FUND, PAGE n'inclut pas une taxe sur les gaz à effet de serre de manière directe dans ses équations. La mitigation des émissions s'exprime plutôt implicitement à travers un sentier d'émissions exogène. Chaque région peut investir dans la réduction des émissions qui permet d'éviter les impacts des changements climatiques et dans l'adaptation aux changements climatiques qui permet de réduire les impacts des changements climatiques. Similairement au modèle FUND, la croissance de la production est exogène dans PAGE. Tout comme pour le modèle DICE, l'évolution de la population est exogène dans PAGE. Les coûts de réduction des émissions du modèle suivent des équations calibrées sur la courbe des coûts marginaux de réduction des émissions calibrée selon les études de McKinsey (McKinsey, 2009) et Aldy et al. (Aldy et al., 2016). L'augmentation du niveau des connaissances en matière de réduction des émissions réduit le coût marginal de la réduction des émissions. Le niveau des connaissances en matière de réduction des émissions respecte les études de Rubin et al. (Rubin et al., 2015) sur le taux d'apprentissage dans la production électrique.

Il est possible d'investir dans l'adaptation aux impacts de marché des changements climatiques, aux impacts hors-marché des changements climatiques et aux impacts de la montée du niveau des mers. FUND distingue l'adaptation de type plateau qui permet d'éliminer tous les impacts qui ne dépassent pas un certain seuil de sévérité et l'adaptation de type impact qui réduit les impacts quand ils surviennent. Les différents impacts dépendent du niveau des deux types de protection et ne peuvent pas dépasser 30% du PIB régional. L'apparition d'impacts des discontinuités climatiques est aléatoire, mais devient plus probable lorsque la température moyenne mondiale excède un certain seuil de tolérance. Si des impacts sur-

viennent à une période, ils persistent aux périodes suivantes et se dissipent progressivement. Les autres types d'impacts sont minimisés par les deux types d'adaptation. Comparativement à la version antérieure du PAGE, PAGE-ICE inclut de nouvelles équations de dommages économiques calibrés sur l'étude de Burke et al. (Burke et al., 2015) sur l'effet des chocs de température sur la production. Tous les impacts sont agrégés dans le temps avec un taux d'escompte dans l'espace et avec une pondération d'équité qui donne plus de poids aux régions plus pauvres en termes de consommation par habitant que la région de référence, qui est ici l'Union européenne.

Le niveau des mers dépend du niveau des mers initial, du niveau des mers à l'équilibre et du temps de réponse du niveau des mers aux changements climatiques. Le niveau des mers à l'équilibre dépend à son tour de la sensibilité du niveau des mers à la croissance de la température, de la température moyenne mondiale et du niveau des mers préindustriel.

La température mondiale dépend en grande partie de la sensibilité climatique et de l'effet albedo. Au lieu d'être un paramètre comme dans les modèles précédents, la sensibilité climatique est déterminée par une équation liant la réponse climatique transitoire à un paramètre de temps de réponse climatique. Les paramètres de l'effet albedo dépendent de la température mondiale. La température régionale est la température mondiale multipliée par un facteur régional d'amplification.

Le CO₂, le CH₄, le N₂O, les gaz à effets de serre linéaires, les aérosols sulfatés et les autres gaz à effet de serre contribuent au niveau de forçage radiatif. Le forçage radiatif et les concentrations de ces gaz sont déterminés selon des équations calibrées sur des données historiques et des projections. Une part du CO₂ est naturellement absorbée par les terres et par les océans. La fonte des pergélisols libère du CO₂ et du CH₄ additionnel. Une moyenne des projections des modèles SiBCASA (Simple Biosphere Carnegie-Ames-Stanford Approach) et JULES (Joint UK Land Environment Simulator) est utilisée pour déterminer les émissions additionnelles de CO₂ et de CH₄.

2.4 Études antérieures sur le coût social du carbone

Existant pendant plus de deux décennies sous une forme ou une autre, les trois modèles considérés ici ont été l'objet d'un grand nombre d'études. Nous présentons les publications les plus récentes utilisant les versions les plus à jour de ces modèles.

Climate Change : The Ultimate Challenge for Economics de Nordhaus (Nordhaus, 2019) utilise le DICE-2016R3 pour estimer un coût social du carbone de 45 \$ US 2018/tCO₂ (58 \$ CA 2018/tCO₂) en 2020 dans son scénario de base. Nordhaus actualise les coûts et bénéfiques avec un taux d'escompte d'un peu plus de 4%, mais il présente aussi les résultats d'un test de sensibilité qui montre que le coût social du carbone en 2020 s'étire de 27 \$ US 2018/tCO₂ (35 \$ CA 2018/tCO₂) avec un taux d'escompte de 5% à 515 \$ US 2018/tCO₂ (667 \$ CA 2018/tCO₂) avec un taux d'escompte de 1% en passant par 104 \$ US 2018/tCO₂ (135 \$ CA 2018/tCO₂) avec un taux d'escompte de 3%.

Un papier antérieur du même auteur, *Projections and Uncertainties about Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies* (Nordhaus, 2018) utilise une version stochastique du DICE-2016R2 pour étudier les incertitudes dans le coût social du carbone. Cette fois, le coût social du carbone en 2020 est d'environ 35,7 \$ US 2010/tCO₂ (53,3 \$ CA 2018/tCO₂). Pour des taux d'escompte alternatifs, le coût social du carbone en 2020 peut être aussi bas que 21,7 \$ US 2010/tCO₂ (32,4 \$ CA 2018/tCO₂) avec un taux d'escompte de 5% et aussi haut que 299,6 \$ US 2010/tCO₂ (446,9 \$ CA 2018/tCO₂) avec un taux d'escompte de 1,4%. Pour un taux d'escompte de 3%, le coût social du carbone est de 85,3 \$ US 2010/tCO₂ (127,2 \$ CA 2018/tCO₂).

Enfin, *Revisiting the Social Cost of Carbon* (Nordhaus, 2016) de Nordhaus utilise le DICE-2016R1, la version que nous utilisons, pour estimer un coût social du carbone en 2020 de 37,2 \$ US 2010/tCO₂ (55,5 \$ CA 2018/tCO₂). Il trouve un coût social du carbone en 2020 de 22,6 \$ US 2010/tCO₂ (33,7 \$ CA 2018/tCO₂) avec un taux d'escompte de 5% et de 266,5 \$ US 2010/tCO₂ (397,5 \$ CA 2018/tCO₂) avec un taux d'escompte de 1,4%. Pour un taux d'escompte de 3%, le coût social du carbone est de 87,3 \$ US 2010/tCO₂ (130,2 \$ CA 2018/tCO₂).

On peut déjà constater que l'estimation du coût social du carbone est nettement plus élevé avec des modèles plus récents. C'est en effet une tendance généralisée que Nordhaus révèle dans son étude de l'évolution du modèle DICE entre 1992 et 2017. Bien qu'un passé de sous-estimation systématique du coût social du carbone ne suggère pas nécessairement que le coût social du carbone est encore sous-estimé à ce jour, celui-ci démontre l'importance de la recherche dans les sciences de la Terre et les sciences économiques qui met sans cesse à jour nos connaissances sur l'évolution et les impacts des changements climatiques.

Moins de publications utilisent le FUND 3.9 et le PAGE-ICE a été publié trop récemment

pour être étudié en profondeur. Le coût social du carbone en 2010 estimé par la version la plus récente du FUND est de 6,6 \$ US 1995/tCO₂ (13,2 \$ CA 2018/tCO₂) pour un taux d'escompte de 3% (Anthoff et al., 2014) alors que le coût social du carbone en 2009 estimé par le PAGE09, le prédécesseur du PAGE-ICE, est une moyenne de 106 \$ US 2005/tCO₂ (173 \$ CA 2018/tCO₂) (Hope, 2013). Tout comme DICE, les versions plus récentes du FUND et PAGE estiment un coût social du carbone supérieur à leurs prédécesseurs.

Au début des années 2010, Environnement et Changement climatique Canada a mené une enquête sur l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre au bout de laquelle le ministère a recommandé l'utilisation du coût social du carbone pour évaluer les politiques qui visent la réduction des émissions. Mieux connue comme le Groupe de travail interministériel canadien sur le coût social des gaz à effet de serre, cette étude a aussi présenté des estimations du coût social du carbone utilisant les modèles DICE2010, FUND 3.8 et PAGE09. Les sentiers de production, de population et d'émissions de ces modèles ont été harmonisés pour suivre des trajectoires associées à cinq scénarios distincts de l'EMF-22 et leur paramètre de sensibilité climatique a été traité comme une variable aléatoire. Pour chacun des cinq scénarios, 10 000 valeurs du coût social du carbone ont été calculées avec un taux d'escompte de 3%. Une moyenne des résultats des trois modèles et des cinq scénarios a été effectuée et le coût social du carbone moyen ainsi que le coût social du carbone au 95^e percentile de la distribution des coûts sociaux du carbone calculés, représentant la faible mais non négligeable possibilité d'impacts majeurs, ont été rapportés. Une mise à jour technique du rapport publiée en 2016 estime le coût social du carbone moyen en 2020 à 45,1 \$ CA 2012/tCO₂ (48,5 \$ CA 2018/tCO₂) et le coût social du carbone au 95^e percentile de la distribution en 2020 à 190,7 \$ CA 2012/tCO₂ (205,2 \$ CA 2018/tCO₂). (Voir la référence [16].)

Depuis la dernière publication du Groupe de travail interministériel canadien sur le coût social des gaz à effet de serre en 2016, deux versions complètes du modèle DICE ont été développées (DICE-2013R et DICE2016R), le modèle FUND 3.8 a laissé place au modèle FUND 3.9 et PAGE09 a été succédé par PAGE-ICE. Sachant que les versions plus récentes de ces modèles génèrent typiquement des estimations supérieures du coût social du carbone, il peut être instructif de comparer les résultats de la présente étude à ceux de ce rapport.

2.5 Paramètres des modèles d'évaluation intégrée

Étant donné la non-unanimité de la communauté scientifique sur la valeur la plus appropriée des paramètres des modèles d'évaluation intégrée, l'étude des incertitudes dans les éléments exogènes de ces modèles est un champ de recherche actif. Plusieurs études concernant les trois modèles auxquels on s'intéresse ont été publiées. Par exemple, une étude effectuant une analyse de sensibilité des paramètres du DICE2007 trouve que les paramètres du taux d'escompte, le facteur exponentiel de la fonction de dommage, la sensibilité climatique et la croissance de la productivité totale des facteurs sont les éléments les plus déterminants dans le calcul du coût social du carbone par le modèle DICE (Anderson, 2014). Une autre étude effectuant une analyse de sensibilité des paramètres du FUND 3.7 trouve que les paramètres du taux d'escompte, certains paramètres d'impact climatique et la sensibilité climatique sont les éléments les plus déterminants dans le calcul du coût social du carbone par le modèle FUND (Anthoff et Tol, 2013). Finalement, une étude effectuant une analyse de sensibilité des paramètres du PAGE09 trouve que les paramètres du taux d'escompte, certains paramètres d'impact climatique et la sensibilité climatique sont les éléments les plus déterminants dans le calcul du coût social du carbone par le modèle PAGE (Hope, 2013). Les paramètres du taux d'escompte, la sensibilité climatique et la productivité sont alors les éléments communs aux trois modèles les plus déterminants dans le calcul du coût social du carbone.

2.5.1 Taux d'escompte

Les créateurs de chacun des modèles étudiés proposent différentes valeurs des paramètres du taux d'escompte. Nordhaus calibre le modèle DICE pour qu'il génère un taux d'épargne concordant à la réalité, proposant un taux de préférence pour le présent de 1,5% par année et une aversion relative à l'inégalité intertemporelle de 1,45 (Nordhaus, 2014) qui génèrent un taux d'escompte moyen de 4,25% jusqu'en 2100 dans le modèle DICE-2016R (Nordhaus, 2017). Tol et Anthoff utilisent plutôt un taux de préférence pour le présent de 1% et une aversion relative à l'inégalité intertemporelle unitaire dans le scénario de base du FUND, obtenant un taux d'escompte moyen de 3% (Anthoff et al., 2014). Hope (Hope, 2013) préconise effectuer des tirages aléatoires des taux de préférence pour le présent et des taux d'aversion relative à l'inégalité intertemporelle à partir d'une distribution triangulaire dans le modèle PAGE. Il considère que le taux de préférence pour le présent suit une distribution entre 0,1% et 2% avec un pic à 1% et que l'aversion relative à l'inégalité intertemporelle suit une

distribution entre 0,5 et 2 avec un pic à 1. Les préférences des auteurs en ce qui trait au taux de préférence pour le présent sont entre 1% et 1,5% et celles en ce qui trait à l'aversion relative à l'inégalité intertemporelle sont entre 1 et 1,45.

Bien qu'il fait maintenant plus d'une douzaine d'années, le Rapport Stern publié en 2006 mérite d'être mentionné pour la controverse qu'il a semé entre autres en plaidant pour l'utilisation d'un taux de préférence pour le présent de 0,1% bien inférieur à celui utilisé par la plupart des économistes. Argumentant que les individus sont impatients puisque leur mortalité les rend incertains sur la possibilité de jouir des fruits d'un projet dans le futur, Stern considère que la seule interprétation valable du taux de préférence pour le présent appliqué à la société est la croyance collective sur ses chances d'extinction partielle ou totale. Ainsi, il soutient que le taux de préférence pour le présent de 1% utilisé par beaucoup d'économistes sous-entend que l'humanité croirait que sa probabilité de survie un siècle est de seulement 36,8%. Selon lui, cette croyance est improbable et le taux de préférence pour le présent devrait plutôt s'approcher de 0% (Stern, 2006). Le taux de préférence pour le présent de 0,1% défendu par Stern est équivalent à un taux d'escompte moyen de 1,4% (Nordhaus, 2007).

Un certain nombre d'études s'appuyant sur des sondages d'économistes ont aussi été effectués. Par exemple, celle de Weitzman se basant sur un sondage de 2160 économistes provenant de 48 pays menée en 2001 trouve que ses répondants préconisent en moyenne un taux d'escompte de 3,96%. Un sondage plus sélectif de 50 économistes aboutit à une moyenne similaire de 4,09%. Weitzman propose alors que le taux d'escompte le plus approprié est celui de 4% qui décline progressivement jusqu'à environ 0% dans le futur lointain. Il estime que le taux d'escompte fixe équivalent est de 1,75% (Weitzman, 2001). Un sondage plus récent de Drupp et Freeman auprès de 197 économistes mené en 2015 trouve un taux d'escompte de long terme recommandé moyen de 2,25% et médian de 2%. 38% des répondants proposent un taux de préférence pour le présent entre 0% et 0,1%. La médiane et la moyenne de la distribution des réponses sur le taux de préférence pour le présent le plus approprié sont respectivement 0,50% et 1,10% et celle des réponses sur l'aversion relative à l'inégalité intertemporelle la plus appropriée sont respectivement de 1,35 et de 1 (Drupp et Freeman, 2015).

Bien qu'aucun actif financier de très long terme n'a été découvert pour guider les recommandations du taux d'escompte approprié pour l'évaluation des projets de très long terme, les actifs immobiliers ont été utilisés pour inférer le taux d'escompte implicite dans

les choix des participants de ces marchés. Les marchés immobiliers du Royaume-Uni et des anciennes colonies britanniques ont la particularité de permettre l'échange permanent d'un droit de propriété (*freehold*) et l'échange temporaire d'un droit de superficie (*leasehold*) pour une maturité entre 99 et 999 ans. En observant les différences de prix entre les transactions permanentes et les transactions temporaires de propriétés similaires à l'aide de données britanniques de transactions immobilières du *HM Land Registry* et de données de Singapour de transactions immobilières de l'*Urban Redevelopment Authority* et en les attribuant à la valeur des rentes perpétuelles obtenues après expiration du droit de superficie, les auteurs trouvent que plus de 10% de la valorisation d'une propriété provient des flux financiers se produisant plus de 100 ans dans le futur. Ceci sous-entend un taux d'escompte de 2,6% pour les projets avec autant de risque que celui qui existe dans les marchés immobiliers. Si le marché immobilier est risqué dans le très long terme, cela implique un taux d'escompte sans risque inférieur à 2,6% (Giglio et al., 2015). Cette étude semble suggérer que le taux d'escompte moyen obtenu dans le sondage de Weitzman contredit les préférences révélées des individus en ce qui trait au bien être des générations futures et qu'un taux d'escompte plus proche de la moyenne obtenue dans le sondage de Drupp et Freeman de 2,25% ou même inférieur à celle-ci serait plus justifié. À notre connaissance, bien que d'autres pays du Commonwealth comme le Canada et l'Australie possèdent un marché immobilier avec cette même particularité, cette étude utilisant les données du Royaume-Uni et du Singapour est unique.

Prenant en compte les divergences dans les opinions sur le taux d'escompte le plus approprié dans l'évaluation des projets climatiques, nous préférons retenir un éventail de taux d'escompte. Ceux-ci sont de 1%, 1,4%, 2%, 2,5%, 3%, 4% et 5%. Afin d'alléger l'analyse, nous faisons abstraction de la structure spécifique du taux d'escompte et nous ne nous penchons que sur une valeur moyenne du taux d'escompte entre l'année initiale et l'année finale. Ceci équivaut à fixer une élasticité de la consommation nulle dans la règle de Ramsey.

$$r = \delta + \gamma g \xrightarrow{\gamma=0} r = \delta$$

2.5.2 Sensibilité climatique

La sensibilité climatique représente la variation de la température moyenne suite à un doublement de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère. Puisque la valeur de ce paramètre ne fait pas l'unanimité de la communauté scientifique, nous préférons le traiter comme une variable aléatoire tirée à partir d'une certaine fonction de densité de probabilité. De manière

générale, les opinions de la communauté scientifique ne semblent pas avoir beaucoup changé depuis le dernier rapport du GIEC et le dernier rapport du Groupe de travail interministériel canadien sur le coût social des gaz à effet de serre. Une des études citées par le dernier rapport du GIEC ainsi que par de nombreuses études sur les changements climatiques est celle d'Olson et al. (2012) qui estime que la valeur de la sensibilité climatique se trouve sur une distribution centrée à $3,1^{\circ}\text{C}$ avec $1,8^{\circ}\text{C}$ et $4,9^{\circ}\text{C}$ comme bornes de confiance à 95% (Olson et al., 2012). Nordhaus ajuste cette distribution de probabilité sur une courbe log-normale centrée sur 1,106 avec erreur-type de 0,2646 pour estimer l'effet de l'incertitude dans les paramètres du DICE-2016R2 (Nordhaus, 2017).

Une autre étude souvent utilisée est celle de Roe et Baker (Roe et Baker, 2007) qui situe la valeur de la sensibilité climatique dans une distribution centrée à $3,5^{\circ}\text{C}$ avec $1,91^{\circ}\text{C}$ et $5,85^{\circ}\text{C}$ comme bornes de confiance à 90% (Interagency Working Group on Social Cost of Carbon, 2010). Bien qu'Olson et al. n'indiquent pas explicitement les bornes de confiance à 90% de leur distribution, nous estimons qu'elle doit se situer entre $1,95^{\circ}\text{C}$ et $4,66^{\circ}\text{C}$ puisque ces valeurs bornent 90% des valeurs de 100 000 tirages aléatoires à partir de la distribution de Nordhaus. En comparant ces deux distributions, on peut anticiper que les distributions des valeurs du coût social du carbone vont être plus étirées et centrées sur des valeurs plus élevées. Une étude plus récente de Cox, Huntingford et Williamson resserre l'intervalle des valeurs de sensibilité climatique plausibles, estimant que celles-ci se situent sur une distribution centrée à $2,8^{\circ}\text{C}$ avec $1,6^{\circ}\text{C}$ et $4,0^{\circ}\text{C}$ comme bornes de confiance à 95% (Cox et al., 2018). La distribution des valeurs probables du coût social du carbone se basant sur cette distribution serait plus étroite et centrée vers des valeurs plus faibles. Puisque cette étude est trop récente pour être bien revue par des pairs et puisqu'elle n'invalide pas les résultats d'Olson et al., nous nous fions à la distribution de probabilité définie par Nordhaus pour générer nos valeurs aléatoires de sensibilité climatique.

2.5.3 Productivité

La littérature sur la croissance économique dans le long terme est clairsemée, surtout quand il est question de projections nationales et d'analyse des incertitudes. Christensen, Gillingham et Nordhaus utilisent une approche combinant un sondage d'experts et des méthodes statistiques de projection pour estimer la croissance économique mondiale entre 2010 et 2100 à $2,1\%$ par année avec erreur-type de $1,1\%$ (Christensen et al., 2018). Un récent

rapport de l'OCDE projetant la croissance économique de 46 pays estime que la croissance mondiale va baisser à 2% par année en 2060 à cause de la réduction de la croissance économique des pays émergents, mais ne précise pas les incertitudes dans ces projections (Guillemette et Turner, 2018). Plusieurs initiatives ont été développées dans un effort d'harmoniser les intrants des modèles climatiques. L'une des plus récentes est le *Shared Socioeconomic Pathways* qui est un ensemble de cinq sentiers socioéconomiques représentant des futurs plausibles sans politique climatique résumés dans le tableau suivant.

Tableau 2 – Caractéristiques des sentiers socioéconomiques SSP

	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
Développement économique	Élevé	Moyen	Faible	Faible	Élevé
Croissance démographique	Faible	Moyen	Élevé	Moyen	Faible
Progrès social et technologique	Élevé	Moyen	Faible	Inégal	Élevé
Inégalités	Faible	Moyen	Élevé	Élevé	Faible
Émissions	Faible	Moyen	Élevé	Élevé	Élevé

Le SSP1 représente un monde avec de faibles défis de mitigation et d'adaptation. L'économie est dynamique et la croissance de la population est faible. Le progrès social et technologique est élevé et bénéficie à une grande partie de la population. Les émissions sont faibles grâce à l'adoption généralisée de stratégies de développement durable.

Le SSP3 représente un monde avec des défis élevés en matière de mitigation et d'adaptation. Les pays du monde se referment sur eux-même et les conflits se multiplient. Les politiques nationales sont non-coopératives et la tâche de développer l'économie mondiale est délaissée. L'économie stagne et la population mondiale augmente en grande partie à cause des pays en développement. Le progrès social et technologique est faible alors que les inégalités sont élevées. Les émissions sont élevées à cause d'un manque d'intérêt pour les questions environnementales. Aux prises avec une multitude de problèmes locaux et réticents à travailler ensemble, les pays ont de la difficulté à coordonner des stratégies de mitigation et d'adaptation climatique.

Le SSP2 est un cas intermédiaire entre le SSP1 et le SSP3 avec des défis modérés de mitigation et d'adaptation. Celui-ci agit comme le sentier socioéconomique moyen.

Le SSP4 représente un monde avec de faibles défis de mitigation et des défis d'adaptation élevés. Le développement économique est faible et la croissance de la population est moyenne. Le progrès social et technologique est élevé dans les pays industrialisés et faible dans les pays sous-développés. Tout comme les inégalités internationales, les inégalités individuelles s'exacerbent. Les émissions sont élevées, mais des investissements dans des énergies vertes ont quand même lieu. La mitigation des émissions reste ainsi une option, mais l'adaptation est hors de portée des régions pauvres.

Le SSP5 représente un monde avec des défis élevés de mitigation et de faibles défis d'adaptation. Un développement économique carburé par les énergies fossiles combiné à une faible croissance de la population, à un bon progrès social et technologique et à de faibles inégalités permettent aux populations de bien gérer les impacts des changements climatiques même si la mitigation est difficile dans cette société dépendante sur les énergies fossiles (Riahi, 2017).

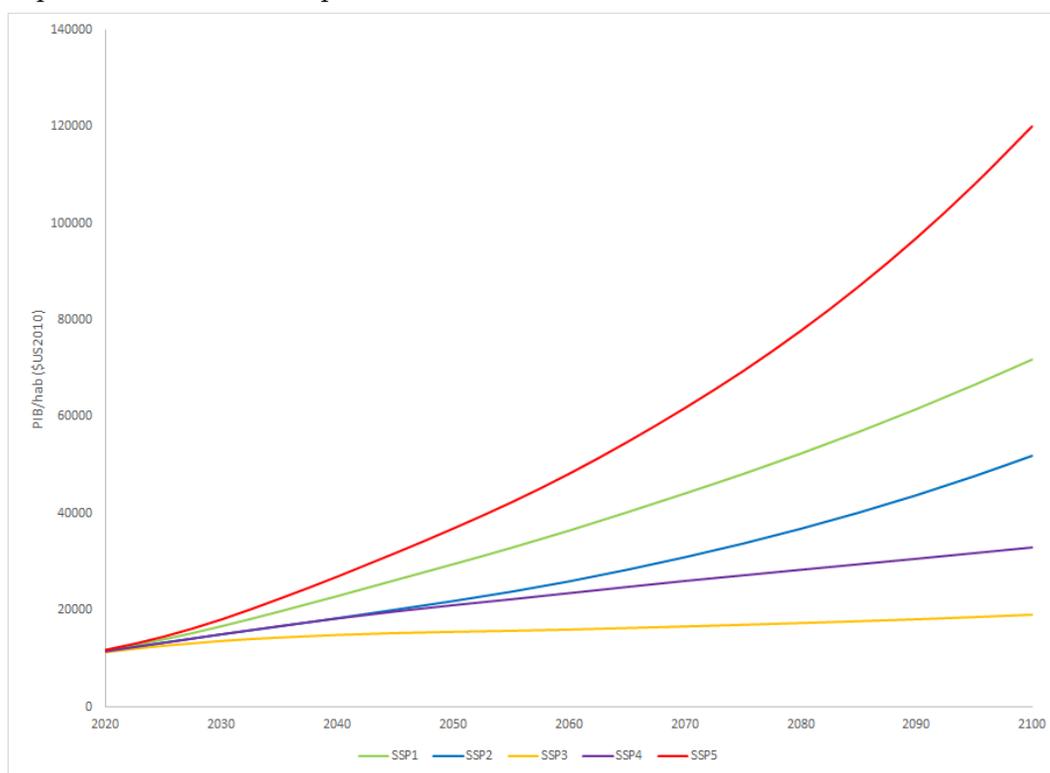
Des équipes de l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE), de l'Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués (IIASA) et de l'Institut de recherche de Potsdam sur les effets du changement climatique (PIK) ont effectué des projections économiques de la production de presque tous les pays du monde jusqu'en 2100. Des chercheurs de l'IIASA ont pris en charge la projection des populations nationales jusqu'en 2100 (Samir et Lutz, 2017). Notons que ces sentiers ne sont pas associés à des probabilités de réalisation. L'étude de Christensen, Gillingham et Nordhaus susmentionnée compare ses projections avec celles des SSP, trouvant que les taux de croissance sous-entendus par le SSP2 correspondent à la médiane de leurs distributions des taux de croissance et que ceux sous-entendus par le SSP5 correspondent au 75^e centile de leurs distributions des taux de croissance. Ils concluent que les SSP échouent à capturer le quartile supérieur de leurs distributions, ainsi potentiellement sous-estimant les effets potentiels d'une croissance effrénée écologiquement insoutenable.

Bien que l'étude de Christensen, Gillingham et Nordhaus a l'avantage de se pencher sur les incertitudes dans les projections, elle ne nous permet pas de d'obtenir des valeurs de la productivité régionale et des incertitudes dans la productivité régionale des régions du FUND et du PAGE. À notre connaissance, aucune étude systématique évaluant les projections de long terme de tous les pays ainsi que leurs incertitudes n'existe. À moins de mener une étude parallèle dédiée au sujet, on ne peut donc pas traiter des incertitudes dans la productivité projetée par les modèles FUND et PAGE. Nous utilisons donc les projections de l'OCDE et de

l'IIASA pour la production et la population jusqu'en 2100 dans cinq futurs plausibles (Dellink et al., 2017), gardant en tête les préoccupations soulevées par Christensen, Gillingham et Nordhaus.

Bien que les sentiers socioéconomiques évoluent différemment l'un de l'autre, ceux que nous utilisons maintiennent généralement leur relation en terme de leur niveau du PIB mondial par habitant. Le SSP3 et le SSP4 sont respectivement les sentiers socioéconomiques avec le plus petit et le second plus petit PIB mondial par habitant alors que le SSP5 et le SSP1 sont respectivement les sentiers socioéconomiques avec le plus grand et le second plus grand PIB mondial par habitant.

Graphique 1 – PIB mondial par habitant de 2020 à 2100 selon le sentier socioéconomique



2.6 Méthodologie

Nous utilisons la version des modèles codée sur le cadre de construction des modèles d'évaluation intégrée à source ouverte Mimi du langage de programmation Julia principalement développé par le groupe de recherche sur l'énergie et les ressources de Anthoff. Mimi

facilite la création, la modification et l'exécution des modèles en uniformisant la syntaxe des codes entre les modèles, en séparant leurs codes en composantes qui peuvent être modifiées isolément et en offrant diverses fonctionnalités qui peuvent être appelées par de simples commandes. Étant mis sur pied récemment, ce cadre en pleine évolution contient actuellement une quinzaine de modèles, incluant DICE2016-R1, FUND 3.9 et PAGE-ICE. Alors que les implémentations de FUND 3.9 et PAGE-ICE étaient disponibles sur Julia au début de notre recherche, celle de DICE-2016R1 ne l'était pas. En nous référant à l'implémentation du DICE-2013R sur Julia ainsi qu'au modèle DICE-2016R1 développé par Nordhaus sur Excel et GAMS, nous reproduisons le modèle DICE-2016R1 sur Julia.

2.6.1 Coût social du carbone

Nous harmonisons les trois modèles pour améliorer la comparabilité entre leurs résultats. D'abord, nous forçons les trois modèles à suivre les sentiers de production et de population des SSP développés par l'OCDE et l'IIASA jusqu'en 2100, la dernière année des projections. Pour éviter de faire des hypothèses ténues sur la croissance future de ces valeurs, nous supposons de la stagnation dans la production et la population après 2100. Les données historiques de la production proviennent de l'ONU et de la Banque Mondiale et les données historiques de la population proviennent de l'ONU. Les valeurs de production et de population sont ajustées pour respecter les unités des modèles, agrégées dans les régions des modèles et intégrées dans les modèles. Parce que la production est endogène dans DICE2016-R1, nous ajustons le paramètre de la productivité totale des facteurs qui dicte l'évolution de la production de manière à ce que cette dernière suive les sentiers du SSP par méthode itérative des points fixes. Tout comme dans le reste du rapport, tous les prix sont convertis en dollars canadiens de 2018. On utilise d'abord le déflateur du PIB du Canada ou celui des États-Unis pour ajuster les prix à l'inflation jusqu'en 2018. Au besoin, nous convertissons les prix en dollars canadiens avec le taux de change annuel moyen de 2018 rapporté par la Banque du Canada.

Contrairement à DICE-2016R1 et FUND 3.9, le paramètre de sensibilité climatique du PAGE-ICE est déterminé par deux autres paramètres au lieu d'être une constante. Nous modifions donc légèrement le code du PAGE-ICE pour que son paramètre de sensibilité prenne une valeur fixe. Nous définissons le paramètre de sensibilité climatique comme une variable aléatoire à distribution log-normale de moyenne 1,106 et d'erreur-type de 0,2646 comme Nordhaus l'a fait dans son étude des incertitudes dans le modèle DICE-2016R (Nordhaus,

2017).

Puisque l'année finale de chacun des modèles est différente, un risque de biais à la hausse se pose pour les modèles qui prennent en compte des horizons plus éloignés. Par conséquent, nous limitons l'agrégation des coûts et des bénéfices des trois modèles à l'an 2300, qui est l'année finale analysée par PAGE-ICE. Hormis la population, la production et le taux d'escompte, les autres valeurs des modèles sont laissées intactes.

Pour chaque modèle, nous effectuons d'abord 100 000 tirages aléatoires de leurs paramètres incertains, incluant celui de la sensibilité climatique. Dans le cas du DICE-2016R1, seul le paramètre de sensibilité climatique est stochastique. Nous calculons par la suite le coût social du carbone pour les cinq sentiers socioéconomiques (SSP1, SSP2, SSP3, SSP4 et SSP5) et les sept taux d'escompte invariables retenus (1%, 1,4%, 2%, 2,5%, 3%, 4% et 5%). Nous avons donc 100 000 estimations du coût social du carbone pour chacun des 35 états du monde. Les statistiques qui nous intéressent sont la moyenne et la médiane, représentant les valeurs les plus probables, ainsi que le 95^e centile de la distribution, représentant les scénarios catastrophiques à basse probabilité.

2.6.2 Inadéquation des politiques climatiques

Nous utilisons aussi le modèle DICE-2016R1 pour illustrer les conséquences de l'inadéquation des politiques climatiques. Pour ce faire, nous utilisons les paramètres de sensibilité climatique associés aux coûts sociaux du carbone situés sur les 19 demi-déciles de la distribution formée par les 100 000 estimations. À l'aide du module d'optimisation BlackBoxOptim sur Julia, nous générons la meilleure politique pour les 5 sentiers socioéconomiques et les 19 valeurs du paramètre de sensibilité climatique. Puisque les mesures monétaires sont plus claires et moins controversées que les mesures d'utilité, nous définissons la meilleure politique comme étant celle qui maximise la somme escomptée à 2% et à 3% des revenus par habitant des années multiples de 5 entre 2020 et 2510. L'optimisation consiste alors à évaluer le modèle avec différentes politiques jusqu'à l'atteinte de la politique maximisant la fonction objectif suivante.

$$\max_{\mu_t} \sum_{t=2}^{99} \frac{y_t}{(1 + \rho)^{5(t-2)}}$$

Cette politique est exprimée par un vecteur de taxes carbone qui entre dans le modèle par l'équation (A.1) décrite dans la section 2.3.1 sur DICE-2016R1.

Les taux de contrôle des émissions des 44 premiers éléments du vecteur sont d’au plus 1 (100%) et d’au plus 1,2 (120%) pour les éléments suivants. On rappelle que le modèle suppose que les concentrations atmosphériques de gaz carbonique peuvent être réduites depuis 2160.

$$\mu_t = \begin{cases} \max \left\{ \left(\frac{\tau_{u_t}}{B_t} \right)^{\frac{1}{\theta_2 - 1}}, 1 \right\} & t = [1, 40] \\ \max \left\{ \left(\frac{\tau_{u_t}}{B_t} \right)^{\frac{1}{\theta_2 - 1}}, 1.2 \right\} & t = (40, 100] \end{cases}$$

2.7 Résultats

Nous présentons maintenant les résultats de nos calculs et estimations du coût social du carbone et de l’inadéquation potentielle des politiques climatiques. Nous avons exécuté les modèles d’évaluation intégrée sur un ordinateur portable avec processeur Intel i7-9750H (2,60 GHz avec 6 coeurs physiques et 12 coeurs logiques) et 16 Go de mémoire vive. En raison de la simplicité du modèle et de la présence d’un seul paramètre stochastique, DICE2016-R1 prend 2 à 3 heures pour exécuter les simulations. Par contre, PAGE-ICE et FUND nécessitent une semaine de travail ininterrompu pour générer l’éventail des résultats. La calcul des 95 politiques prend environ 8 heures pour une optimisation à 100 000 étapes.

2.7.1 Coût social du carbone

De manière générale, les distributions du coût social du carbone ont des caractéristiques typiques.¹ Un taux d’escompte plus faible a pour effet de tirer la distribution du coût social du carbone vers la droite en l’aplatissant pour deux raisons. D’abord, les dommages climatiques dans le long terme sont relativement plus importants. Ensuite, un calcul qui confère plus de poids au futur est plus sensible aux incertitudes qui se renforcent dans le temps. Ainsi, les mesures de dispersion telles que l’écart-type sont négativement corrélées avec le taux d’escompte dans les trois modèles. FUND 3.9 présente toutefois des anomalies, notamment dans les queues de ses distributions. En effet, comme le montrent les graphiques 24 à 28, le modèle génère des valeurs exceptionnellement faibles ou élevées. Un examen plus attentif de celles-ci montre que de telles valeurs extrêmes se situent en-dessous du 3^e centile

1. La plupart des tableaux et graphiques décrivant les distributions du coût social du carbone en 2020 selon le taux d’escompte et le scénario socioéconomique issues du DICE-2016R1, du FUND 3.9 et du PAGE-ICE sont rapportés en annexe pour alléger la lecture du texte principal.

et au-dessus du 97^e centile de la distribution. Bien qu'il est possible que ce ne soit que le résultat de la combinaison de paramètres aléatoires mutuellement incompatibles, ceci invite quand même à un regard critique des résultats de ce modèle. La relation entre le coût social du carbone des différents sentiers socioéconomiques est toujours préservée. En effet, les sentiers socioéconomiques représentant des futurs riches ont des coûts sociaux du carbone plus élevés. En plus d'augmenter avec la diminution du taux d'escompte, le coût social du carbone augmente donc aussi avec l'augmentation de la production. Ceci est un résultat attendu parce qu'un plus grand niveau de production implique un plus grand niveau d'émissions.

La distribution du coût social du carbone estimée par tous les modèles est asymétrique vers la droite, comme illustré par les diagrammes à boîte des distributions (graphiques 15–19, 24–28 et 33–37) et par leur coefficient d'asymétrie (tableaux 26, 32 et 38). Ainsi, la plupart des valeurs du coût social du carbone sont plus élevées que les estimations centrales des modèles. Le coût social du carbone moyen des distributions est toujours plus élevé que son homologue déterministe dans le PAGE-ICE. Ceci est aussi vrai dans le DICE-2016R1 et dans le FUND 3.9 tant que le taux d'escompte est différent de 2,5%. Ainsi, il semble que la version déterministe de ces modèles ne capture pas la valeur centrale du coût social du carbone, sauf dans le cas exceptionnel du taux d'escompte de 2,5% pour le DICE-2016R1 et le FUND 3.9.

Les résultats de la moyenne, de la médiane et du 95^e centile des distributions selon le taux d'escompte et le sentier socioéconomique sont présentés dans les tableaux 21–23, 27–29 et 33–35 en annexe. Nous nous concentrons toutefois sur les résultats du SSP2 représentant le sentier socioéconomique moyen pour des taux d'escompte de 3,0%, 2,5% et 2,0%.

Tableau 3 – Coût social du carbone moyen, au 50^e centile et au 95^e centile en 2020 (\$ CA 2018) du DICE, du FUND et du PAGE avec taux d'escompte de 3%, 2,5% et 2% dans le SSP2

		Moyenne	50e centile	95e centile
2%	DICE	124.33	119.64	202.55
	FUND	264.98	241.94	578.31
	PAGE	232.85	177.34	621.78
	Moyenne des modèles	207.39	179.64	467.55
2.5%	DICE	81.01	78.48	128.48
	FUND	186.01	164.84	432.30
	PAGE	161.83	122.08	442.04
	Moyenne des modèles	142.95	121.80	334.27
3%	DICE	55.52	54.09	85.89
	FUND	132.05	113.80	327.11
	PAGE	117.12	87.74	325.46
	Moyenne des modèles	101.56	85.21	246.15

Les résultats du DICE2016-R1 sont ici toujours plus faibles et ceux du FUND 3.9 sont ici toujours plus élevés que ceux du PAGE-ICE. Supposant que les trois modèles sont également crédibles, on peut considérer les moyennes des estimations des trois modèles. Si on se fie sur la moyenne des distributions, le coût social du carbone suggéré par les modèles est de 101,56 \$ CA 2018, 142,95 \$ CA 2018 et 207,39 \$ CA 2018 respectivement pour des taux d'escompte de 3%, 2,5% et 2%. Si on se fie plutôt sur la valeur centrale des distributions, le coût social du carbone suggéré par les modèles est de 85,21 \$ CA 2018, 121,80 \$ CA 2018 et 179,64 \$ CA 2018 respectivement pour des taux d'escompte de 3%, 2,5% et 2%. Les valeurs moyennes des modèles au 95^e centile représentant des scénarios rares avec impacts élevés des changements climatiques sont de 246,15 \$ CA 2018, 334,27 \$ CA 2018 et 467,55 \$ CA 2018 respectivement pour des taux d'escompte de 3%, 2,5% et 2%.

En plus de considérer ces modèles comme également crédibles, le groupe de travail canadien sur le coût social des gaz à effet de serre traite les cinq sentiers socioéconomiques

équiprobables. Ses estimations principales du coût social du carbone sont alors une moyenne des tous les modèles et de tous les sentiers socioéconomiques. Procédant d’une manière similaire, on peut comparer nos résultats avec actualisation de 3% avec les siennes.

Tableau 4 – Moyenne du coût social du carbone moyen et au 95^e centile en 2020 (\$ CA 2018) du DICE, du FUND et du PAGE avec taux d’escompte de 3% de tous les sentiers socioéconomiques

	Moyenne	95e centile
DICE	58.64	90.46
FUND	141.17	349.45
PAGE	123.56	345.23
Moyenne des modèles	107.79	261.71
Groupe de travail	48.50	205.20

En utilisant des sentiers socioéconomiques et des modèles développés plus récemment, nous obtenons un coût social du carbone moyen plus de deux fois plus élevé et un coût social du carbone au 95^e centile de la distribution 27,5% plus élevé que ceux estimés par le groupe de travail sur le coût social des gaz à effet de serre. Bien que la politique environnementale canadienne actuelle visant une taxe carbone de 50 \$ en 2022 soit dans le voisinage du coût social du carbone suggéré par ce rapport, elle est nettement insuffisante d’après notre révision de la valeur du coût social du carbone.

En somme, le coût social du carbone moyen de tous les modèles pour le sentier socioéconomique moyen se situe entre 101,56 \$ CA 2018 et 207,39 \$ CA 2018, dépendant du taux d’escompte jugé approprié. Sachant que l’essence émet en moyenne 2,29 kgCO₂/L (0,00229 tCO₂/L) (Ressources naturelles Canada, 2014), l’imposition d’une tarification basée sur ces coûts sociaux du carbone équivaldrait à une surcharge de 0,23 \$/L à 0,48 \$/L. Le montant optimal d’une taxe carbone prenant en compte les contraintes politiques et fiscales et le meilleur moyen de la mettre en oeuvre sont des sujets qui dépassent le cadre de ce rapport, mais le coût social du carbone reste un point de repère utile dans l’élaboration des politiques environnementales.

2.7.2 Inadéquation des politiques climatiques

Comme on a pu le constater dans la section précédente, les estimations du coût social du carbone sont sujettes à des erreurs parfois substantielles. Ainsi, les hypothèses sous-tendant des décisions environnementales peuvent aussi être erronées, induisant des politiques climatiques inadéquates. Étant confrontés à de telles incertitudes, les décideurs et le public qu'ils desservent peuvent trouver utile de connaître le coût d'une politique climatique inadéquate. Plus précisément, on voudrait comparer les situations où les politiques en vigueur ne sont pas en adéquation avec la réalité et les situations sans politiques climatiques. Si les risques de se trouver dans une situation où il aurait été préférable de ne pas avoir de politique climatique en commettant une erreur sont faibles ou si les pertes par rapport à une situation sans politique climatique sont minimales, cette information pourrait rassurer les décideurs et le public qu'ils desservent de la sûreté d'adopter des politiques climatiques et ainsi encourager l'adoption de politiques climatiques. Le contraire serait aussi utile dans la manière où il suggérerait une approche plus conservatrice à l'égard des politiques climatiques. En guise d'illustration, nous évaluons une série de politiques définies par différents vecteurs de taxes carbone dans le modèle DICE-2016R1.

Un vecteur de taxes carbone est généré pour chaque combinaison des 5 sentiers socioéconomiques et des 19 valeurs du paramètre de sensibilité climatique à l'aide du module d'optimisation BlackBoxOptim sur Julia tel que la valeur actualisée nette du revenu par habitant entre 2020 et 2510 est maximisée. Puisque les dommages climatiques sont agrégés au-delà de l'an 2300, les taxes carbone sont nettement supérieures aux valeurs du coût social du carbone calculées dans la section précédente. Cinq échantillons des taxes carbone optimisées sont présentés à titre d'exemple dans les pages suivantes. Toutes choses étant égales par ailleurs, le sentier des taxes carbone devient plus abrupte lorsqu'une sensibilité climatique plus élevée est utilisée par le modèle lors de l'optimisation. De plus, le sentier des taxes carbone devient plus abrupte lorsqu'un sentier socioéconomique représentant un monde plus riche est utilisé par le modèle lors de l'optimisation. L'hypothèse d'un climat plus sensible aux émissions de CO₂ et d'un futur plus prospère induit donc des politiques climatiques plus sévères.

Tableau 5 – Échantillon des taxes carbone optimisées pour une sensibilité climatique au 5e centile de la distribution

	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
2020	80.34	64.21	38.27	51.84	109.81
2025	85.91	70.37	41.80	56.03	116.35
2030	94.57	79.25	46.92	62.22	127.82
2035	105.79	89.68	52.76	69.68	144.33
2040	118.95	100.69	58.65	77.74	165.14
2045	133.05	111.91	64.49	86.00	188.19
2050	147.27	123.02	70.15	94.09	211.96
2055	160.67	133.54	75.36	101.56	234.98
2060	172.76	143.25	80.04	108.24	256.51
2065	183.56	152.27	84.34	114.33	276.59
2070	193.06	160.67	88.44	119.88	295.19
2075	201.01	168.34	92.35	124.84	311.91
2080	207.13	175.16	96.08	129.04	326.34
2085	211.73	181.31	99.64	132.63	338.92
2090	215.23	187.07	103.04	135.71	350.38
2095	218.53	193.24	106.41	138.61	362.37
2100	223.21	201.31	110.01	141.87	357.64
2105	232.09	214.19	114.29	146.24	348.70
2110	237.86	222.21	116.98	149.06	339.98
2115	241.75	227.38	118.73	150.96	331.48
2120	244.51	230.85	119.91	152.27	323.19
2125	246.58	233.29	120.74	153.25	315.11
2130	248.22	235.10	121.36	154.01	307.23
2135	249.57	236.52	121.85	154.64	299.55
2140	250.74	237.69	122.24	155.16	292.06
2145	251.79	238.70	122.58	155.63	284.76
2150	252.74	239.60	122.89	156.05	277.64
2155	253.62	240.42	123.16	156.44	270.70
2160	254.44	241.17	123.42	156.80	263.93

Tableau 6 – Échantillon des taxes carbone optimisées pour une sensibilité climatique au 10e centile de la distribution

	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
2020	91.99	73.41	43.23	58.93	125.63
2025	98.30	80.46	47.27	63.71	132.95
2030	108.15	90.62	53.12	70.76	145.87
2035	120.92	102.55	59.80	79.28	164.51
2040	135.91	115.13	66.54	88.49	188.05
2045	151.98	127.95	73.25	97.93	214.10
2050	168.18	140.63	79.76	107.19	240.96
2055	183.47	152.64	85.76	115.75	266.97
2060	197.26	163.72	91.15	123.42	291.30
2065	209.62	174.03	96.12	130.42	314.05
2070	220.50	183.61	100.86	136.83	335.16
2075	229.64	192.39	105.39	142.55	354.19
2080	236.72	200.22	109.71	147.44	370.69
2085	242.10	207.31	113.85	151.63	385.10
2090	246.27	214.01	117.81	155.26	376.21
2095	250.25	221.23	121.74	158.70	366.81
2100	255.86	230.67	125.95	162.56	357.64
2105	266.32	245.69	130.95	167.72	348.70
2110	273.18	255.14	134.13	171.09	339.98
2115	277.89	261.29	136.22	173.39	331.48
2120	281.27	265.47	137.66	175.03	323.19
2125	283.83	268.46	138.69	176.27	315.11
2130	285.86	270.70	139.46	177.25	307.23
2135	287.56	272.48	140.09	178.06	299.55
2140	289.01	273.95	140.62	178.76	292.06
2145	284.76	275.21	141.07	179.38	284.76
2150	277.64	276.32	141.48	179.94	277.64
2155	270.70	270.70	141.84	180.46	270.70
2160	263.93	263.93	142.17	180.94	263.93

Tableau 7 – Échantillon des taxes carbone optimisées pour une sensibilité climatique au 15e centile de la distribution

	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
2020	100.46	80.12	46.82	64.08	137.11
2025	107.30	87.81	51.23	69.29	144.96
2030	118.00	98.89	57.62	76.98	158.91
2035	131.89	111.91	64.91	86.27	179.08
2040	148.19	125.64	72.29	96.32	204.56
2045	165.68	139.62	79.63	106.63	232.75
2050	183.32	153.45	86.77	116.75	261.83
2055	199.97	166.55	93.35	126.12	289.99
2060	215.01	178.63	99.28	134.52	316.36
2065	228.49	189.86	104.75	142.20	341.03
2070	240.39	200.33	109.96	149.24	363.99
2075	250.40	209.92	114.96	155.55	384.72
2080	258.20	218.50	119.73	160.95	395.75
2085	264.17	226.29	124.31	165.61	385.86
2090	268.84	233.70	128.69	169.65	376.21
2095	273.34	241.70	133.06	173.51	366.81
2100	279.64	252.18	137.73	177.84	357.64
2105	291.26	268.79	143.28	183.60	348.70
2110	298.93	279.29	146.83	187.40	339.98
2115	304.22	286.18	149.19	190.02	331.48
2120	308.04	290.89	150.83	191.91	323.19
2125	310.93	294.27	152.03	193.35	315.11
2130	307.23	296.83	152.94	194.51	307.23
2135	299.55	299.55	153.68	195.47	299.55
2140	292.06	292.06	154.30	196.31	292.06
2145	284.76	284.76	154.84	197.06	284.76
2150	277.64	277.64	155.33	197.74	277.64
2155	270.70	270.70	155.77	198.37	270.70
2160	263.93	263.93	156.17	198.95	263.93

Tableau 8 – Échantillon des taxes carbone optimisées pour une sensibilité climatique au 90e centile de la distribution

	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
2020	199.71	159.80	88.70	124.72	274.70
2025	212.05	174.73	97.55	134.87	287.48
2030	232.10	196.45	110.38	150.01	312.47
2035	258.49	222.03	125.17	168.45	349.73
2040	289.69	249.02	140.34	188.57	397.52
2045	323.38	276.57	155.63	209.44	451.25
2050	357.64	303.89	170.70	230.14	460.68
2055	390.36	329.87	184.82	249.59	449.16
2060	420.47	354.06	197.76	267.36	437.93
2065	426.98	376.86	209.90	283.91	426.98
2070	416.31	398.51	221.63	299.43	416.31
2075	405.90	405.90	233.05	313.70	405.90
2080	395.75	395.75	244.12	326.35	395.75
2085	385.86	385.86	254.94	337.72	385.86
2090	376.21	376.21	265.51	348.08	376.21
2095	366.81	366.81	276.22	358.26	366.81
2100	357.64	357.64	287.74	357.64	357.64
2105	348.70	348.70	301.23	348.70	348.70
2110	339.98	339.98	310.53	339.98	339.98
2115	331.48	331.48	317.28	331.48	331.48
2120	323.19	323.19	322.44	323.19	323.19
2125	315.11	315.11	315.11	315.11	315.11
2130	307.23	307.23	307.23	307.23	307.23
2135	299.55	299.55	299.55	299.55	299.55
2140	292.06	292.06	292.06	292.06	292.06
2145	284.76	284.76	284.76	284.76	284.76
2150	277.64	277.64	277.64	277.64	277.64
2155	270.70	270.70	270.70	270.70	270.70
2160	263.93	263.93	263.93	263.93	263.93

Tableau 9 – Échantillon des taxes carbone optimisées pour une sensibilité climatique au 95e centile de la distribution

	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
2020	217.80	174.35	96.20	135.60	300.29
2025	231.02	190.54	105.87	146.62	313.73
2030	252.66	214.12	119.87	163.09	340.57
2035	281.23	241.92	136.04	183.17	380.91
2040	315.07	271.27	152.66	205.13	432.97
2045	351.69	301.24	169.46	227.93	472.49
2050	389.04	331.01	186.04	250.60	460.68
2055	424.91	359.38	201.62	271.95	449.16
2060	437.93	385.90	215.94	291.51	437.93
2065	426.98	411.03	229.41	309.80	426.98
2070	416.31	416.31	242.47	327.01	416.31
2075	405.90	405.90	255.21	342.91	405.90
2080	395.75	395.75	267.60	357.10	395.75
2085	385.86	385.86	279.75	369.93	385.86
2090	376.21	376.21	291.65	376.21	376.21
2095	366.81	366.81	303.74	366.81	366.81
2100	357.64	357.64	316.75	357.64	357.64
2105	348.70	348.70	331.96	348.70	348.70
2110	339.98	339.98	339.98	339.98	339.98
2115	331.48	331.48	331.48	331.48	331.48
2120	323.19	323.19	323.19	323.19	323.19
2125	315.11	315.11	315.11	315.11	315.11
2130	307.23	307.23	307.23	307.23	307.23
2135	299.55	299.55	299.55	299.55	299.55
2140	292.06	292.06	292.06	292.06	292.06
2145	284.76	284.76	284.76	284.76	284.76
2150	277.64	277.64	277.64	277.64	277.64
2155	270.70	270.70	270.70	270.70	270.70
2160	263.93	263.93	263.93	263.93	263.93

On considère 95 réalisations formées par les combinaisons entre les 5 sentiers socioéconomiques et le réchauffement climatique associé à 19 demi-déciles de la sensibilité climatique ainsi que 96 stratégies (95 politiques optimisées pour un sentier socioéconomique donné et une sensibilité climatique donnée et absence de politique). Ceci implique 9120 états du monde qui peuvent être organisés sur une matrice à 96 rangées et 95 colonnes. Les gains ou les pertes en terme de valeur actualisée nette du PIB par habitant des états du monde où une politique climatique a été adoptée par rapport aux états du monde où aucune politique climatique n'a été adoptée sont illustrés sur des cartes thermiques. Les tableaux 10 à 14 présentent quelques statistiques sommaires des gains ou pertes dans le revenu intertemporel et les graphiques 2 à 6 présentent l'intensité des gains ou des pertes dans chaque état du monde. La politique optimale associée à une certaine réalisation dans un certain sentier socioéconomique se situe sur la diagonale de la sous-section appropriée des politiques en vigueur. La meilleure politique est alors d'un bleu plus foncé ou bien d'un rouge ou jaune moins foncé que les autres rangées de la colonne de la sous-section. Les axes vont des valeurs plus petites aux valeurs plus grandes de la sensibilité climatique, résultant en une carte thermique avec gradient diagonal.

Quelques faits saillants ressortent des tableaux et des cartes thermiques. D'abord, la plupart des scénarios résultent en un gain. En tout, 8379 des 9025 scénarios (92,8%) présentent une amélioration par rapport aux scénarios d'inaction. La plus grande perte observée est de 0,95% et le plus grand gain observé est de 4,92%. Ensuite, il n'existe aucun scénario de perte lorsque la politique implémentée sous-estime la croissance économique. Si on se rappelle l'ordre de richesse des sentiers socioéconomiques, on remarque que les politiques supposant une croissance inférieure à la croissance réalisée n'aboutissent jamais à des pertes par rapport aux scénarios sans action. Cela ne signifie cependant pas qu'il serait préférable de systématiquement se fier à des prédictions modestes de la croissance économique. En effet, plus la croissance anticipée s'éloigne de la croissance réalisée, moins le gain moyen par rapport à la situation sans politique climatique est élevé. Surestimer la croissance économique ou surestimer la valeur de la sensibilité climatique peut résulter en une valeur actualisée nette du PIB par habitant inférieure à celle du scénario sans politique, mais ceci n'arrive que dans des cas de grande erreur. Si le sentier socioéconomique est bien défini par la politique climatique en vigueur, seul supposer une sensibilité climatique dans le 85^e centile de la distribution expose à un tel risque. Même là, ce dernier est minime puisqu'une perte n'est réalisée que si la vraie valeur de la sensibilité climatique se situe dans le 10^e centile de la distribution. Si la

sensibilité climatique est bien définie par la politique climatique en vigueur, seul supposer être dans un sentier socioéconomique SSP5, alors que le sentier socioéconomique réalisé est le SSP3, peut résulter en une perte par rapport à l'inaction. Sachant que le SSP5 est le sentier socioéconomique avec le plus grand PIB par habitant et que le SSP3 est le sentier socioéconomique avec le plus petit PIB par habitant, ceci signifie que seule une politique qui surestime grossièrement la croissance économique est susceptible d'être pire que l'absence de politique.

Tableau 10 – Statistiques sommaires des gains ou pertes dans le revenu intertemporel entre 2020 et 2510 selon différentes politiques en SSP1 avec taux d'escompte de 3%

SSP	Perte	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	Écart-type
SSP1	0	1.20%	1.17%	0.05%	2.55%	0.56%
SSP2	0	1.19%	1.14%	0.16%	2.53%	0.51%
SSP3	0	0.97%	0.93%	0.34%	2.16%	0.37%
SSP4	0	1.10%	1.04%	0.32%	2.40%	0.44%
SSP5	5	1.16%	1.11%	-0.20%	2.55%	0.64%

Tableau 11 – Statistiques sommaires des gains ou pertes dans le revenu intertemporel entre 2020 et 2510 selon différentes politiques en SSP2 avec taux d'escompte de 3%

SSP	Perte	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	Écart-type
SSP1	4	0.86%	0.83%	-0.15%	1.88%	0.45%
SSP2	1	0.87%	0.84%	-0.02%	1.88%	0.41%
SSP3	0	0.75%	0.72%	0.26%	1.68%	0.29%
SSP4	0	0.83%	0.80%	0.15%	1.83%	0.35%
SSP5	24	0.77%	0.74%	-0.42%	1.88%	0.52%

Tableau 12 – Statistiques sommaires des gains ou pertes dans le revenu intertemporel entre 2020 et 2510 selon différentes politiques en SSP3 avec taux d’escompte de 3%

SSP	Perte	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	Écart-type
SSP1	123	0.09%	0.10%	-0.59%	0.56%	0.23%
SSP2	74	0.16%	0.17%	-0.43%	0.56%	0.20%
SSP3	4	0.25%	0.25%	-0.05%	0.56%	0.12%
SSP4	24	0.23%	0.23%	-0.21%	0.56%	0.16%
SSP5	230	-0.12%	-0.10%	-0.95%	0.56%	0.30%

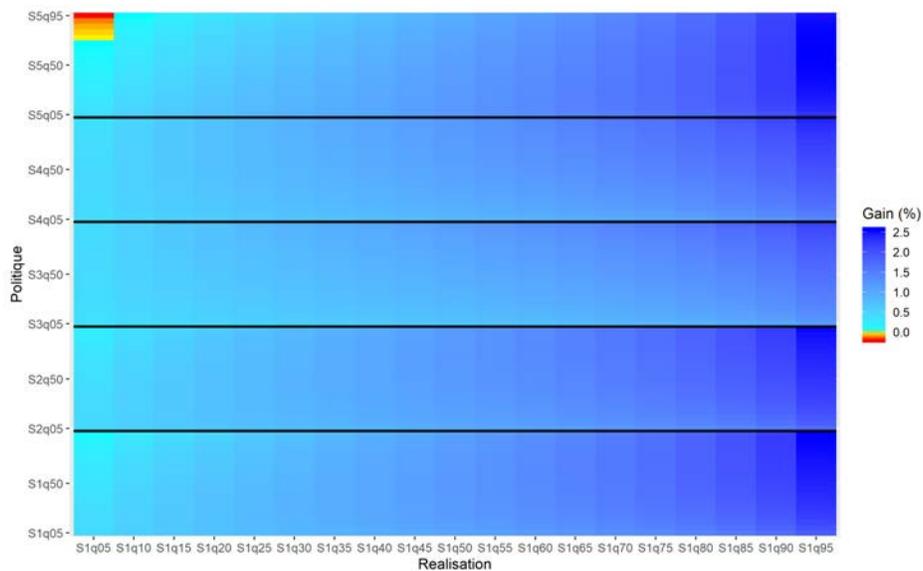
Tableau 13 – Statistiques sommaires des gains ou pertes dans le revenu intertemporel entre 2020 et 2510 selon différentes politiques en SSP4 avec taux d’escompte de 3%

SSP	Perte	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	Écart-type
SSP1	37	0.40%	0.39%	-0.43%	1.06%	0.32%
SSP2	17	0.45%	0.43%	-0.28%	1.06%	0.28%
SSP3	0	0.46%	0.44%	0.07%	1.02%	0.19%
SSP4	2	0.48%	0.46%	-0.08%	1.06%	0.23%
SSP5	101	0.23%	0.22%	-0.76%	1.06%	0.38%

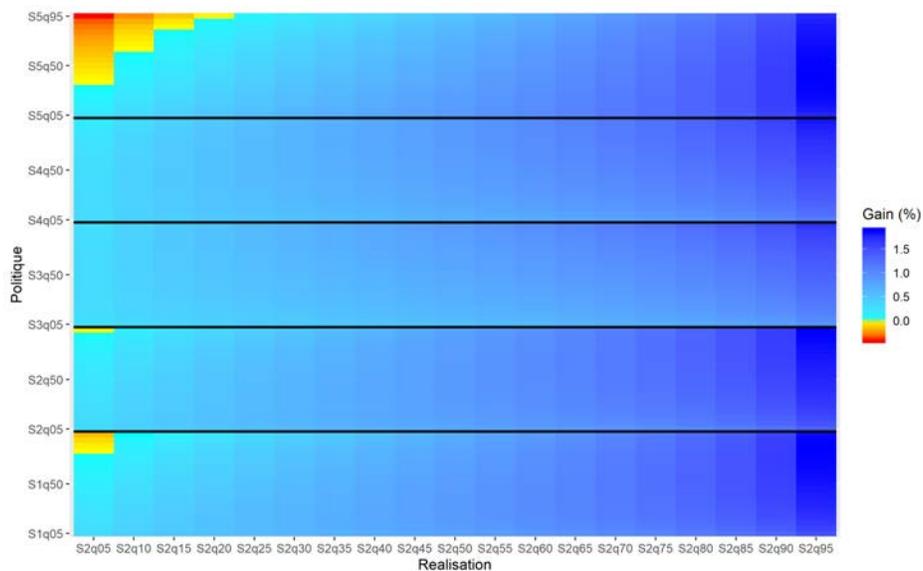
Tableau 14 – Statistiques sommaires des gains ou pertes dans le revenu intertemporel entre 2020 et 2510 selon différentes politiques en SSP5 avec taux d’escompte de 3%

SSP	Perte	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	Écart-type
SSP1	0	2.40%	2.32%	0.78%	4.85%	0.93%
SSP2	0	2.29%	2.19%	0.82%	4.73%	0.86%
SSP3	0	1.71%	1.63%	0.58%	3.84%	0.63%
SSP4	0	2.01%	1.92%	0.69%	4.38%	0.75%
SSP5	0	2.53%	2.46%	0.60%	4.92%	1.04%

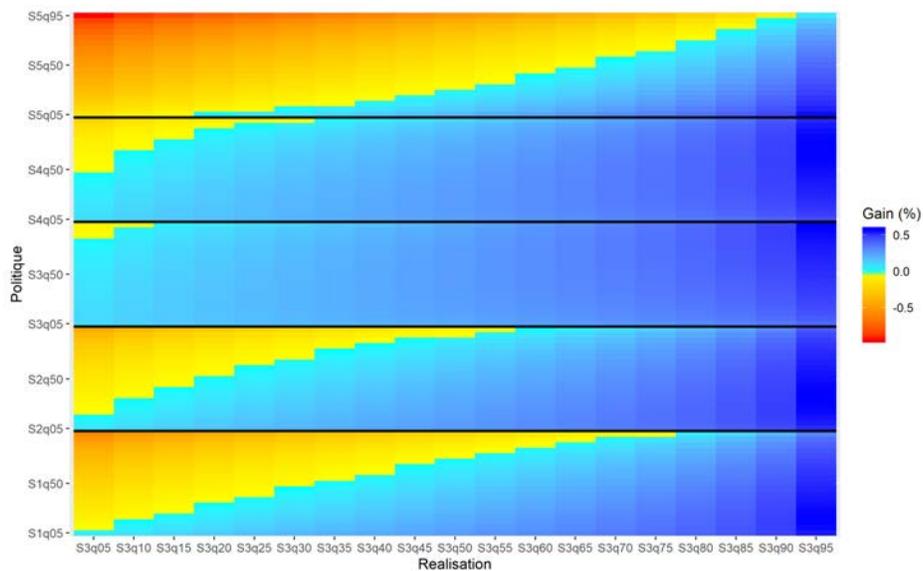
Graphique 2 – Carte thermique des gains ou pertes dans le revenu intertemporel entre 2020 et 2510 selon différentes politiques en SSP1 avec taux d’escompte de 3%



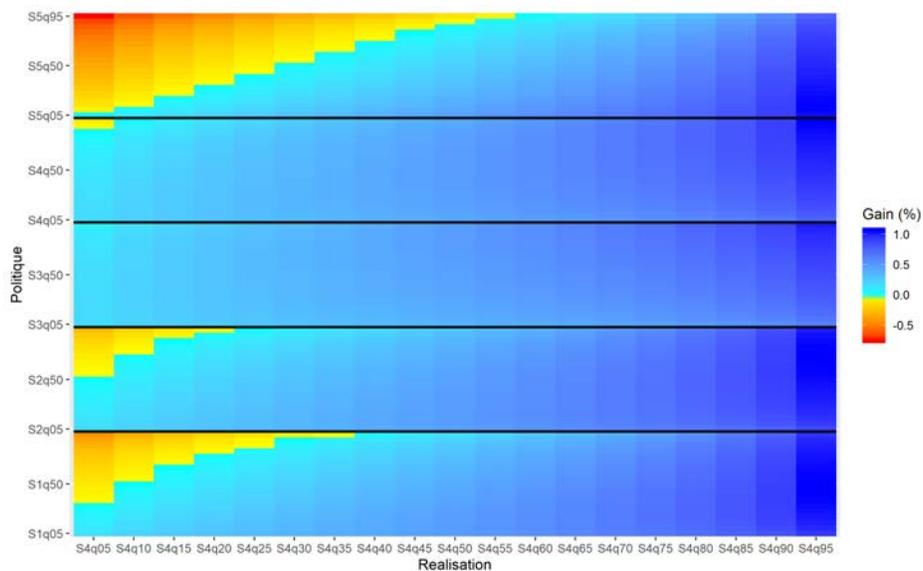
Graphique 3 – Carte thermique des gains ou pertes dans le revenu intertemporel entre 2020 et 2510 selon différentes politiques en SSP2 avec taux d’escompte de 3%



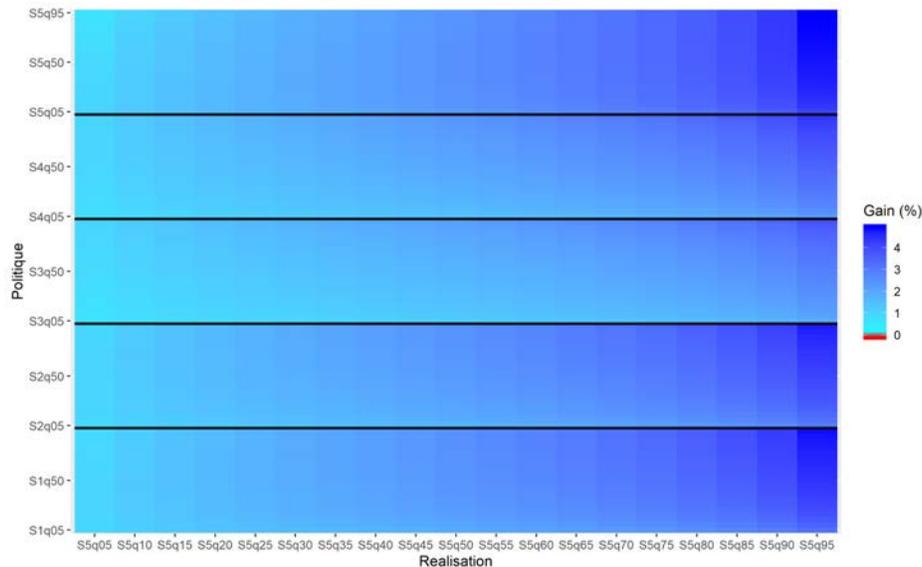
Graphique 4 – Carte thermique des gains ou pertes dans le revenu intertemporel entre 2020 et 2510 selon différentes politiques en SSP3 avec taux d’escompte de 3%



Graphique 5 – Carte thermique des gains ou pertes dans le revenu intertemporel entre 2020 et 2510 selon différentes politiques en SSP4 avec taux d’escompte de 3%



Graphique 6 – Carte thermique des gains ou pertes dans le revenu intertemporel entre 2020 et 2510 selon différentes politiques en SSP5 avec taux d’escompte de 3%



Bien qu’utile pour évaluer les projets à longs horizons tels que les politiques climatiques, la valeur actualisée nette peut dissimuler des détails importants sur le calendrier des coûts et bénéfices ainsi que sur l’intensité des coûts et bénéfices de chaque période. On conclut cette section en décrivant brièvement l’évolution du PIB par habitant des 9120 scénarios de 2030 à 2500. Quelque soit la politique climatique implémentée, le revenu dans tous les scénarios avec politique est inférieur à celui des scénarios sans politique jusqu’en 2040. Une minorité de scénarios commence à engendrer des petits bénéfices dès 2050, mais ce n’est qu’après 2070 que plus de la moitié des scénarios et près de 90% des scénarios avec politique optimale appropriée présentent des gains par rapport aux scénarios d’inaction et que le gain moyen devient positif. En 2100, tous les scénarios optimaux appropriés et la presque totalité de tous les scénarios présentent des gains. Jusqu’à atteindre ce point, la moyenne la plus faible est une perte de 0,45%. Par contraste, les gains moyens par rapport aux scénarios sans politique dépassent 10% dès 2200. Les 50 premières années sont alors caractérisées par des pertes plutôt acceptables pour la plupart des scénarios et les années subséquentes engendrent généralement des gains croissants. Le modèle suggère donc que des bénéfices seraient réalisés dans des délais mesurés en décennies, mais aussi qu’ils apparaîtraient à la fin de ce siècle ou au début du siècle prochain.

Tableau 15 – Statistiques sommaires des gains ou pertes dans le revenu de 2030 à 2500
selon différentes politiques

Année	Perte (optimal)	Perte	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	Écart-type
2030	95	9025	-0.25%	-0.19%	-1.04%	-0.02%	0.20%
2040	95	9025	-0.39%	-0.29%	-1.71%	-0.02%	0.32%
2050	94	8843	-0.45%	-0.31%	-2.25%	0.04%	0.43%
2060	83	7212	-0.39%	-0.23%	-2.13%	0.20%	0.48%
2070	49	4736	-0.16%	-0.03%	-1.71%	0.55%	0.44%
2080	11	2190	0.27%	0.32%	-1.17%	1.57%	0.43%
2090	2	519	0.87%	0.81%	-0.66%	3.72%	0.60%
2100	0	50	1.61%	1.44%	-0.25%	6.26%	0.94%
2150	0	0	5.98%	5.22%	0.68%	22.29%	3.44%
2200	0	0	9.28%	7.97%	0.93%	37.60%	5.72%
2250	0	0	11.17%	9.46%	1.05%	47.92%	7.18%
2300	0	0	11.67%	9.79%	0.99%	52.04%	7.73%
2350	0	0	11.72%	9.76%	0.93%	53.27%	7.89%
2400	0	0	11.63%	9.65%	0.90%	53.36%	7.89%
2450	0	0	11.48%	9.51%	0.89%	52.92%	7.83%
2500	0	0	11.31%	9.36%	0.87%	52.21%	7.73%

2.8 Conclusion

Nous utilisons des versions récentes des modèles d'évaluation intégrée DICE, FUND et PAGE pour évaluer une distribution de valeurs du coût social du carbone. On traite le paramètre climatique comme une variable aléatoire dans les trois modèles et on considère les variantes stochastiques du FUND et du PAGE, effectuant 100 000 tirages aléatoires par méthode Monte Carlo pour chacune des distributions. En tout, nous évaluons une distribution pour chacun des 5 sentiers socioéconomiques SSP déterminant l'évolution du PIB par habitant des trois modèles et pour 7 taux d'escompte variant de 1,4% à 5%. Nous nous concentrons sur le SSP2 représentant le scénario socioéconomique moyen ainsi que sur les

taux d'escompte entre 2% et 3% que la littérature récente sur les taux d'escompte indique être les valeurs les plus susceptibles d'être appropriées dans l'évaluation des politiques climatiques. Comparant nos résultats avec ceux du groupe de travail canadien sur le coût social des gaz à effet de serre, nous trouvons un coût social du carbone nettement supérieur. Celui-ci est une moyenne de 107,79 \$ CA 2018 entre tous les modèles et tous les sentiers socioéconomiques alors que celui estimé par le groupe de travail canadien avec des versions antérieures des mêmes modèles et d'autres sentiers socioéconomiques est de 48,50 \$ CA 2018.

Nous évaluons les conséquences de l'inadéquation des politiques climatiques avec les réalités climatiques à l'aide du DICE en formulant des politiques conformes à une combinaison de 19 croyances sur la valeur de la sensibilité climatique et 5 croyances sur le sentier socioéconomique approprié et en appariant ces politiques à une combinaison de 19 réalisations sur la valeur de la sensibilité climatique et 5 réalisations du sentier socioéconomique. En tout, 9025 scénarios sont créés où des politiques sont plus ou moins adaptées à la réalité. À la fin de l'exercice, nous trouvons que presque tous les scénarios avec politique climatique présentent un gain par rapport aux scénarios sans politique climatique. Nous trouvons en outre que les pertes possibles sont souvent nettement inférieures aux gains possibles et que les pertes ne sont occasionnées que lors de grandes erreurs dans les hypothèses sur la croissance économique et sur la valeur de la sensibilité climatique. En observant le calendrier des coûts et bénéfices des politiques climatiques, nous trouvons que des gains commencent à être engendrés dans chacun des scénarios dès la fin du 21^e siècle ou bien dès le début du 22^e siècle.

Le chemin vers la détermination du coût social du carbone est semé d'erreurs, mais le travail de concert des sciences naturelles et ses sciences sociales permet de l'éclairer par la compréhension des causes et des conséquences des changements climatiques ainsi que des manières de les freiner et de s'y adapter. Dans le cadre de l'économie, des sujets d'intérêt qui méritent de futures études sont les projections économiques de très long terme, le taux d'escompte de très long terme et les fonctions de dommage climatique. Bien que plusieurs auteurs encouragent d'explorer les incertitudes dans les paramètres environnementaux et économiques des modèles d'évaluation intégrée, nous encourageons aussi à étudier davantage les conséquences d'implémenter des politiques climatiques sous des hypothèses erronées.

A.1 Le modèle DICE

Publié pour la première fois en 1992 par William Nordhaus (Nordhaus, 2018a), le modèle DICE est passé par de nombreuses itérations jusqu'à atteindre sa forme actuelle en 2019 qui est le DICE-2016R3 (Nordhaus, 2019). Cette étude utilise une version antérieure du modèle, le modèle DICE-2016R1 publié en 2016 (Nordhaus, 2017), puisque nous n'avons pas accès aux spécificités des révisions DICE-2016R2 et DICE-2016R3. Bien qu'aucun document exhaustif décrivant le modèle DICE-2016R1 n'existe, un document technique pour le modèle DICE-2013R est disponible (Nordhaus et Sztorc, 2013). Nous utilisons celui-ci en conjonction avec son code GAMS publié sur le site de William Nordhaus (Nordhaus, 2016) et avec le papier présentant les résultats du DICE-2016R1 (Nordhaus, 2017) pour décrire le modèle utilisé. Afin de mieux illustrer les liens entre les équations du modèle, le graphique 7 contenant un schéma simplifié du modèle DICE-2016R1 est ajouté dans l'annexe A.5. La description qui suit est à peu près conforme à une lecture du schéma du bas vers le haut. Une flèche liant une équation à une autre signifie que le résultat d'une équation entre comme variable dans une autre équation. Une flèche bidirectionnelle indique que cette relation est bidirectionnelle.

Le modèle DICE-2016R1 utilise comme base le modèle néoclassique de croissance de Ramsey, l'étendant avec l'investissement climatique. Dans ce modèle, les économies investissent dans l'accroissement du capital pour augmenter la production future et dans le décroissement des émissions pour réduire les dommages des changements climatiques à la production future. Ce modèle a 100 périodes de 5 ans, débutant en 2015 et se terminant en 2510. Le niveau de population est calibré pour suivre les projections démographiques de l'ONU alors que le taux d'épargne est exogène et préalablement optimisé pour maximiser la fonction objectif. Nous allons maintenant décrire chacune des dimensions de ce modèle.

Économie

La fonction objectif du DICE-2016R1 est une fonction d'utilité sociale utilitarienne intertemporelle dont les utilités individuelles à chaque période prennent la forme $(c_t^{1-\gamma})/(1-\gamma)$, où γ est l'aversion relative à l'inégalité temporelle. δ est le taux de préférence pour le présent entrant dans le facteur d'escompte et L_t est le niveau de population.

$$W = 5 \sum_{t=1}^{t=100} \frac{1}{(1+\delta)^{5t}} L_t \frac{c_t^{1-\gamma}}{1-\gamma}$$

Le niveau de population est exogène, dépendant d'un niveau de population asymptotique donné, L_{asym} , et du taux de croissance de la population, g_L . Cette formule est calibrée sur les projections démographiques de l'ONU.

$$L_t = L_{t-1} \left(\frac{L_{asym}}{L_{t-1}} \right)^{g_L}$$

La consommation, C , est la production nette, Q , moins investissements, I .

$$C_t = Q_t - I_t$$

La production nette, Q , est le restant de la production brute Y après les dommages climatiques Ω et les coûts de la réduction des émissions Λ .

$$Q_t = Y_t(1 - \Omega_t - \Lambda_t)$$

La fonction de production, Y , est une fonction de production Cobb-Douglas modifiée par le taux de productivité des facteurs, A , utilisant le capital, K , et le travail, L , comme intrants. β est l'élasticité production-capital dans la fonction de production.

$$Y_t = A_t K_t^\beta L_t^{1-\beta}$$

Le taux de productivité des facteurs, A , est exogène, dépendant du taux de croissance du taux de productivité des facteurs, g_{A_t} . Ce dernier est lui-même fonction du taux de croissance initial, g_{A_0} , et du taux de déclin du taux de croissance, δ_A . DICE-2016R1 suppose donc un ralentissement à long terme dans la croissance du progrès technologique.

$$A_t = \frac{A_{t-1}}{(1 - g_{A_{t-1}})}$$

$$g_{A_t} = g_{A_0} e^{-5\delta_A(t-1)}$$

Le niveau de capital, K_t , est endogène et dépend du niveau d'investissements de la période précédente, I_{t-1} , du niveau de capital de la période précédente, K_{t-1} , et du taux de dépréciation annuel du capital, δ_K .

$$K_t = 5I_{t-1} + (1 - \delta_K)^5 K_{t-1}$$

Le niveau d'investissements, I , est fonction de la production nette, Q , et du taux d'épargne, S .

$$I_t = S_t Q_t$$

Le taux d'épargne S_t est optimisé dans la période étudiée. Le vecteur S des taux d'épargne entre 2015 et 2510 est donc celui qui maximise la fonction d'utilité sociale W .

$$S_t = \arg \max_{S_t} W$$

Coûts de mitigation

La réduction des émissions a un coût Λ qui est fonction du coût ajusté des technologies alternatives qui permettent de produire de l'énergie sans ressources fossiles, θ_1 (*backstop technology*), d'un paramètre θ_2 et d'une variable de contrôle du taux de réduction des émissions, μ . Le taux de réduction des émissions est d'au plus 100% jusqu'en 2155, après quoi la séquestration du gaz carbonique à grande échelle permet de l'augmenter jusqu'à 120%. Cette équation est calibrée sur les fonctions de coûts des modèles d'évaluation intégrée analysés dans une étude de Gillingham et al. (Gillingham et al., 2015) comparant différents modèles d'évaluation intégrée pour déceler les sources principales des déviations dans leurs résultats.

$$\Lambda_t = \theta_{1t} \mu_t^{\theta_2}$$

Le prix ajusté des technologies alternatives, θ_{1t} , exprimé en pourcentage de la production, est fonction de leur prix, B , du ratio production-émissions de l'économie, σ , et d'un paramètre θ_2 . Le prix des technologies alternatives, B , est fonction de leur prix initial, b , et d'un paramètre exogène de croissance, g_b .

$$\theta_{1t} = \frac{B_t \sigma_t}{\theta_2} \text{ où } B_t = b(1 - g_b)^{t-1}.$$

Dommages

Les dommages climatiques, Ω , exprimés en pourcentage de la production, sont fonction de l'accroissement de température atmosphérique depuis 1900 en °C, T_{AT} , et des coefficients Ψ_1 , Ψ_2 et Ψ_3 . Cette fonction est calibrée sur une moyenne pondérée des estimations des dommages climatiques de 26 études, les poids déterminés par la récence et la crédibilité des études, plus un ajustement de 25% conçu pour compenser l'absence de certains types de dommages climatiques dans ces études.

$$\Omega_t = \Psi_1 T_{AT_t} + \Psi_2 (T_{AT_t})^{\Psi_3}$$

Température

L'accroissement de température atmosphérique depuis 1900 en °C, T_{AT_t} , et l'accroissement de température océanique depuis 1900 en °C, T_{OC_t} , sont interdépendants. Ceux-ci sont fonctions des paramètres ξ_1 (vitesse d'ajustement de la température atmosphérique), ξ_2 (ratio du forçage radiatif à l'équilibre après doublement de CO₂ η et de l'impact à l'équilibre sur la température après doublement de CO₂ ς), ξ_3 (coefficient de transfert de la température atmosphérique à la surface des océans) et ξ_4 (coefficient de transfert de la température de la surface des océans à l'océan profond) et du niveau de forçage radiatif, F .

$$T_{AT_t} = T_{AT_{t-1}} + \xi_1[F_t - \xi_t T_{AT_{t-1}} - \xi_3(T_{AT_{t-1}} - T_{OC_{t-1}})]$$

$$T_{OC_t} = T_{OC_{t-1}} + \xi_4(T_{AT_{t-1}} - T_{OC_{t-1}})$$

$$\xi_2 = \frac{\eta}{\varsigma}$$

Le niveau de forçage radiatif, F (différence entre l'énergie solaire reçue et émise), est fonction du forçage radiatif à l'équilibre après doublement de CO₂, η , du forçage radiatif exogène causé par des gaz à effet de serre autres que le CO₂, F_{exo} , de la concentration atmosphérique de CO₂ à la période t et de la concentration atmosphérique de CO₂ à l'ère pré-industrielle (1750).

$$F_t = \eta \log_2 \left(\frac{M_{AT_t}}{M_{AT_{1750}}} \right) + F_{exo_t}$$

Émissions

La concentration de CO₂ dans l'atmosphère, M_{AT} , la concentration de CO₂ dans la biosphère et la surface des océans, M_H , et la concentration de CO₂ dans l'océan profond, M_B , sont interdépendants. Ces variables sont dépendantes des émissions de CO₂, E , et des paramètres de transfert Φ_{11} , Φ_{12} , Φ_{21} , Φ_{22} , Φ_{23} , Φ_{32} et Φ_{33} qui représentent les coefficients de transition d'un milieu à un milieu voisin.

$$M_{AT_t} = \frac{5E_t}{3.666} + \Phi_{11}M_{AT_{t-1}} + \Phi_{21}M_{H_{t-1}}$$

Cette équation ainsi que les équations de la sous-section précédente sont calibrées sur des études récentes inférant des tendances sur des observations passées et sur des études récentes utilisant des simulations climatiques.

Les émissions de CO₂, E , sont la somme des émissions industrielles endogènes, E_{ind} , et des émissions dues à l'utilisation des terres exogènes, E_{terre} . Les émissions industrielles sont fonction du ratio production-émissions de l'économie, σ , du taux de réduction des émissions, μ , et de la production brute, Y . Les émissions dues à l'utilisation des terres sont fonction des émissions dues à l'utilisation des terres initiale, E_{terre0} , et du taux de croissance des émissions dues à l'utilisation des terres, δ_{terre} .

$$E_t = E_{ind_t} + E_{terre_t}$$

$$E_{ind_t} = \sigma_t(1 - \mu_t)Y_t$$

$$E_{terre_t} = E_{terre0}(1 - \delta_{terre})^{t-1}$$

Le ratio production-émissions de l'économie, σ , est exogène et dépendant du ratio production-émissions de l'économie de la période précédente et du taux de décroissance du ratio production-émissions de l'économie (décarbonisation de l'économie), g_σ , qui lui-même dépend d'un paramètre de déclin du taux de décarbonisation δ_σ . Ce dernier paramètre est choisi pour concorder avec le taux de décarbonisation moyen observé dans les économies.

$$\sigma_t = \sigma_{t-1}e^{5g_{\sigma t-1}}$$

$$g_{\sigma t-1}(1 + \delta_\sigma)^5$$

Taxe carbone et taux de contrôle des émissions

La taxe carbone, τ , et le taux de contrôle des émissions, μ , sont reliés ainsi, avec le prix des technologies alternatives, B , et d'un paramètre θ_2 .

$$\tau_t = B_t\mu_t^{\theta_2-1}$$

La taxe carbone n'affecte le modèle qu'à travers le taux de contrôle des émissions. On peut retrouver l'effet de la taxe carbone sur le taux de contrôle des émissions en réécrivant l'équation.

$$\mu_t = \left(\frac{\tau_t}{B_t}\right)^{\frac{1}{\theta_2-1}} \quad (2.3.1)$$

La taxe carbone ne peut pas dépasser le prix des technologies substitues, autrement personne n'utiliserait les énergies fossiles. Ainsi, le taux de contrôle des émissions est limité à 100%.

Cependant, celui-ci saute à 120% si la valeur de la taxe carbone est au moins le prix des technologies substitues après 2155, représentant la possibilité de séquestration du gaz carbonique à grande échelle. Enfin, le coût social du gaz carbonique (CSCO₂) est défini comme un changement marginal de la consommation dû à un changement marginal des émissions.

A.2 Le modèle FUND

Le modèle FUND a été créé par Richard Tol afin d'étudier les interactions stratégiques entre les régions du monde dans leurs politiques climatiques. Sa version la plus récente dénotée FUND 3.9 date de 2014. FUND est un modèle à 16 régions produisant des valeurs pour chaque année de 1950 à 3000. FUND opère sous l'hypothèse que le niveau de production par habitant et la croissance de la population atteignent un plateau peu après 2300 qui se maintient jusqu'à l'an 3000. Nous nous appuyons sur la description technique (Anthoff et Tol, 2014) ainsi que sur le code Julia du FUND 3.9 dans notre description du modèle. Le graphique 8 de l'annexe A.5 contient un schéma simplifié du modèle. La lecture du schéma s'effectue similairement à celle du modèle DICE-2016R1.

Contrairement au DICE présenté dans la section précédente, la production brute du FUND croît à un taux exogène. Toutefois, la production nette est modifiée par les coûts d'abattement des gaz à effet de serre et les coûts des dommages climatiques causés par les changements climatiques. La population brute du FUND croît aussi à un taux exogène, mais est affectée par les changements climatiques contrairement à celle du DICE. En effet, la population nette d'une région est réduite par la mortalité et l'émigration induites par les changements climatiques et agrandie par l'immigration provenant des régions affectées par les changements climatiques. Alors que le modèle précédent contient une unique fonction de dommages climatiques calibrée sur une série d'études, FUND contient une quinzaine de fonctions de dommages climatiques pour différents secteurs de l'économie. Celles-ci sont séparées en fonctions de dommages économiques (changements dans la valeur des ressources hydriques, changements dans le surplus social de l'industrie forestière, changements dans les dépenses de chauffage, changements dans les dépenses de climatisation, changements dans la production agricole, changements dans la valeur des terres sèches, coûts de la protection des terres contre la montée du niveau des mers, coûts des réfugiés climatiques, dommages monétaires des tempêtes tropicales, dommages monétaires des tempêtes extratropicales, autres dommages économiques) et fonctions de dommages hors-marché (changements dans la valeur

des écosystèmes, valorisation des décès et maladies, changements dans la valeur des terres humides, coûts de l'émigration, autres dommages hors-marché). Finalement, ce modèle endogénise quatre gaz à effet de serre, en l'occurrence le gaz carbonique (CO₂), l'oxyde nitreux (N₂O), le méthane (CH₄) et l'hexafluorure de soufre (SF₆) et prend en compte le dioxyde de soufre (SO₂) de manière exogène. Nous présentons maintenant les différentes dimensions du modèle.

Économie

Le niveau de consommation de la région r est la production nette de la région, Y , après épargne effectuée selon un taux d'épargne exogène, S , moins les dommages causés par le réchauffement climatique, $perteseco$, et les dommages hors-marché, $pertesnoneco$. Cette valeur ne peut pas être négative.

$$C_{t,r} = \max \{Y_{t,r}(1 - S) - (perteseco_{t,r} + pertesnoneco_{t,r}), 0\}$$

La production de la région r est déterminée par un taux de croissance exogène, crY , la production de la période précédente nette des dommages environnementaux de la période précédente et les coûts de réduction des émissions des gaz à effet de serre de la période précédente. Le taux de croissance de la production est choisi pour être à mi-chemin entre celui de deux scénarios de l'EMF-14, en occurrence le IS92a et le IS92f.

$$Y_{t,r} = (1 + crY_{t,r})(Y_{t-1,r} - perteseco_{t-1,r}) - coutsred_{t-1,r}$$

La population de la région r est fonction d'un taux de croissance exogène, crP , de la population de la période précédente, de la migration, mig , de l'émigration, $emig$, et des décès, $morts$. Le taux de croissance de la population est inspiré par les mêmes sentiers socioéconomiques que la production.

$$P_{t,r} = (1 + crP_{t,r})P_{t-1,r} + mig_{t-1,r} - emig_{t-1,r} - mortst_{t-1,r}$$

Dommages économiques

Les dommages économiques sont composés de 11 éléments qui sont les impacts sur les ressources hydriques mesurés en \$ US 1995, W , les impacts sur l'industrie forestière mesurés en terme de pourcentage de changement dans le surplus social, F , les impacts énergétiques

due aux changements dans l'utilisation du chauffage mesurés en \$ US 1995, CH , les impacts énergétiques dus aux changements dans l'utilisation de la climatisation mesurés en \$ US 1995, CL , les impacts agricoles en terme de pourcentage de la production, A , la perte des terres sèches en kilomètres carrés, D , le coût de la protection des côtes contre la montée du niveau des mers en milliards de \$ US 1995, $coutsprot$, le coût d'accueil des réfugiés climatiques en \$ US 1995, $coutsmig$, les dommages dus à l'intensification des tempêtes tropicales en \$ US 1995, TD , les dommages dus à l'intensification des tempêtes extratropicales en \$ US 1995, ETD et des autres dommages, $autpertesecco$. Dans le modèle de base, il n'y a pas d'autres dommages. Les pertes économiques régionales ne peuvent pas dépasser le PIB régional.

$$pertesecco_{t,r} = \min\left\{0 - W_{t,r} - F_{t,r}Y_{t,r} - CH_{t,r} - CL_{t,r} - A_{t,r}\frac{GAP_{t,r}}{Y_{t,r}}Y_{t,r} + D_{t,r}VD_{t,r} + coutsprot_{t,r} + coutsmig_{t,r} + TD_{t,r} + ETD_{t,r} + autpertesecco_{t,r}, Y_{t,r}\right\}$$

Les impacts dans les ressources hydriques de la région r en \$ US 1995 sont représentés par l'équation suivante, où α_{eau_r} est un paramètre, $Y_{1990,r}$ est le revenu régional en 1990, σ_{eau} est un paramètre représentant le progrès technologique dans l'approvisionnement en eau, ν est l'élasticité impacts-revenu, κ est l'élasticité impacts-population, T est la température moyenne au-dessus du niveau pré-industriel et γ est l'élasticité impacts-réchauffement. Ces impacts sont au plus 10% du PIB national. Cette équation est spécifiée et calibrée pour conformer aux résultats des études de Downing et al. (Downing et al., 1995, 1996) sur l'utilisation des énergies fossiles dans un contexte environnemental.

$$W_{t,r} = \min\left(\alpha_{eau_r}Y_{1990,r}(1 - \tau)^{t-2000}\left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}}\right)^\kappa\left(\frac{P_{t,r}}{P_{1990,r}}\right)^\nu\left(\frac{T_t}{1.0}\right)^\gamma, \frac{Y_{t,r}}{10}\right)$$

Les impacts dans le surplus social dans l'industrie forestière dans la région r en % du PIB sont une fonction d'un paramètre régional α_{impr_r} , de paramètres globaux ϵ , Σ et γ , du revenu par habitant, y , de la température moyenne mondiale, T , et de la concentration de CO₂. L'équation est calibrée aux estimations des études de Perez-Garcia et al. (Perez-Garcia et al., 1995) et de Sohngen et al. (Sohngen et al., 2001).

$$F_{t,r} = \alpha_{impr_r}\left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}}\right)^\epsilon\left(0.5T_t^\Sigma + 0.5\gamma\ln\left(\frac{CO2_t}{275}\right)\right)$$

Les impacts énergétiques dus aux changements dans l'utilisation du chauffage sont fonction d'un paramètre régional d'impact, α_{CH_r} , de la production régionale en 1990, $Y_{1990,r}$, de la température moyenne mondiale, T , du ratio entre la production par habitant régionale, $y_{t,r}$,

et la production par habitant régionale en 1990, $y_{1990,r}$, de l'élasticité-revenu de la demande de chauffage, ϵ_{CH} , du ratio entre la population régionale, $P_{t,r}$, et la population régionale en 1990, $P_{1990,r}$, et d'un paramètre de progrès technologique dans la fourniture de l'énergie, g^ψ . Tout comme l'équation des impacts sur les ressources hydriques, cette équation est calibrée sur les études de Downing et al.

$$CH_{t,r} = \frac{\alpha_{CH_r} Y_{1990,r} \frac{\arctan(T_t)}{\arctan(1.0)} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^{\epsilon_{CH}} \left(\frac{P_{t,r}}{P_{1990,r}} \right)}{\prod_{s=1990}^t g_{s,r}^\psi}$$

Les impacts énergétiques dus aux changements dans l'utilisation de la climatisation sont fonction d'un paramètre régional d'impact, α_{CL_r} , de la production régionale en 1990, $Y_{1990,r}$, de la température moyenne mondiale, T , d'un paramètre exponentiel, β_{CL} , du ratio entre la production par habitant régionale, $y_{t,r}$ et la production par habitant régionale en 1990, $y_{1990,r}$, de l'élasticité-revenu de la demande de climatisation, ϵ_{CL} , du ratio entre la population régionale, $P_{t,r}$, et la population régionale en 1990, $P_{1990,r}$, et d'un paramètre de progrès technologique dans la fourniture de l'énergie, g^ψ . Cette équation est calibrée sur les études de l'équation précédente.

$$CL_{t,r} = \frac{\alpha_{CL_r} Y_{1990,r} T_t^{\beta_{CL}} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^{\epsilon_{CL}} \left(\frac{P_{t,r}}{P_{1990,r}} \right)}{\prod_{s=1990}^t g_{s,r}^\psi}$$

La part de la production agricole dans la production totale d'une région est fonction de la part de la production agricole en 1990, du ratio de la production par habitant en 1990 et de la production par habitant actuelle et de l'élasticité-revenu de la part de l'agriculture dans l'économie, ϵ . Cette équation est calibrée sur l'étude de Tol (Tol, 2002b) analysant le lien entre le revenu national et l'importance de l'agriculture dans l'économie.

$$\frac{GAP_{t,r}}{Y_{t,r}} = \frac{GAP_{1990,r}}{Y_{1990,r}} \left(\frac{y_{1990,r}}{y_{t,r}} \right)^\epsilon$$

FUND sépare les impacts des changements climatiques sur l'agriculture en trois effets qui sont les impacts dus à la vitesse des changements climatiques, les impacts dus à l'amplitude des changements climatiques et les impacts dus à l'effet fertilisant du CO₂. Le premier effet est toujours négatif puisqu'il implique moins de temps d'adaptation, le second effet peut être positif pour les pays du nord si les changements climatiques rapprochent les températures moyennes aux valeurs optimales pour la croissance végétale et le troisième effet est toujours positif puisqu'il suppose que le CO₂ facilite la croissance végétale. Les impacts totaux sur

l'agriculture en pourcentage de la production agricole ne peuvent pas dépasser 100% de la production agricole.

$$Ag_{t,r} = \min \left(Ag_{t,r}^r Ag_{t,r}^l + Ag_{t,r}^f, 1 \right)$$

Les impacts dus à la vitesse des changements climatiques sont fonction d'un paramètre représentant l'effet d'un réchauffement de 0,04°C sur la production agricole, α_{chang_r} , du changement de température moyenne régionale entre deux périodes, $\Delta T_{t,r}$, d'un paramètre exponentiel β , d'un paramètre de la vitesse d'adaptation, ρ_{rap} , et de la vitesse des changements climatiques de la période passée.

$$Ag_{t,r}^r = \alpha_{chang_r} \left(\frac{\Delta T_{t,r}}{0.04} \right)^\beta + \left(1 - \frac{1}{\rho_{rap}} \right) Ag_{t-1,r}^r$$

Les impacts dus au niveau des changements climatiques sont fonction des paramètres $\delta_{chang_r}^l$ et $\delta_{chang_r}^q$ ainsi que de la température moyenne régionale.

$$Ag_{t,r}^l = \delta_{chang_r}^l T_{t,r} + \delta_{chang_r}^q T_{t,r}^2$$

Les impacts dus à l'effet fertilisant du CO₂ sont fonction d'un paramètre Θ_r et de la concentration atmosphérique du CO₂, CO_{2t} .

$$Ag_{t,r}^f = \Theta_r \ln \left(\frac{CO_{2t}}{275} \right)$$

La perte des terres sèches est proportionnelle à la part non-protégée des terres sèches à risque.

$$D_{t,r} = \overline{D}_{t,r} (1 - prot_{t,r})$$

Les terres sèches à risque sont la différence entre la perte cumulée potentielle des terres sèches et la perte cumulée des terres sèches qui est déjà réalisée.

$$\overline{D}_{t,r} = \overline{CD}_{t,r} - CD_{t-1,r} \quad \text{où} \quad CD_{t,r} = CD_{t-1,r} + D_{t,r}$$

La perte cumulée potentielle des terres sèches est la valeur minimale entre le multiple de la perte des terres sèches par mètre d'augmentation du niveau des mers, δ_r , et du niveau des mers, S^{γ_r} , où γ_r est un paramètre de calibration, et la perte maximale en terres sèches, ζ_r .

$$\overline{CD}_{t,r} = \min [\delta_r S_t^{\gamma_r}, \zeta_r]$$

Le niveau de protection exprimé en pourcentage des côtes protégées est une fonction de la valeur actualisée nette d'une protection totale, $VANVP_{t,r}$, la valeur actualisée nette des

pertes des terres humides, $VANVW_{t,r}$, et de la valeur actualisée nette des terres sèches perdues sans protection, $VANVD_{t,r}$. Ce niveau de protection est au moins nul.

$$prot_{t,r} = \max \left\{ 0, 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{VANVP_{t,r} + VANVW_{t,r}}{VANVD_{t,r}} \right) \right\}$$

La valeur actualisée d'une protection totale est comme suit, avec le taux de préférence pour le présent, ρ , le paramètre d'aversion à l'inégalité temporelle, η , le taux de croissance du revenu par habitant exogène, $g_{t,r}$, le coût unitaire de la protection cotière, π_r , et la montée du niveau des mers depuis la dernière période, ΔS .

$$VANVP_{t,r} = \frac{1 + \rho + \eta + g_{t,r}}{\rho + \eta g_{t,r}} \pi_r \Delta S_t$$

La valeur nette actualisée des pertes des terres humides est exprimée ainsi, avec WL la perte des terres humides, VW la valorisation des terres humides, un paramètre de l'élasticité-revenu de la valeur des terres humides, β_{eau} , un paramètre de l'élasticité entre la densité de la population et la valeur des terres humides, γ_{dens} , le taux de croissance de la population, crP , un paramètre de l'élasticité-taille de la valeur des terres humides $\delta_{elataille}$ et le taux de décroissance des terres humides w . Tous ces paramètres sauf celui de la croissance de la population sont calibrés sur une étude de la valorisation des terres humides de Brander et al. (Brander et al., 2006).

$$VANVW_{t,r} = WL_{t,r} VW_{t,r} \frac{1 + \rho + \eta g_{t,r}}{\rho + \eta g_{t,r} - \beta_{eau} g_{t,r} - \gamma_{dens} crP_{t,r} - \delta_{elataille} w_{t,r}}$$

Les pertes des terres humides sont la valeur minimale entre la somme des pertes des terres humides dus à la croissance du niveau des mers et des pertes des terres humides dus à la protection des côtes et la surface des terres humides à risque. ω_r^s est donc un paramètre représentant les pertes des terres humides par mètre d'augmentation du niveau des mers et ω_r^M est donc un paramètre représentant les pertes des terres humides par pourcentage de protection côtière. WL_r^M est la quantité des terres humides à risque en 1990 et WL^c est la surface cumulée des terres humides perdues.

$$WL_{t,r} = \min (\omega_r^s \Delta S_t + \omega_r^M prot_{t,r} \Delta S_t, WL_r^M - WL_{t-1,r}^c)$$

Les pertes cumulées des terres humides sont la valeur minimale entre la quantité des terres humides à risque en 1990, WL_r^M , et la somme des pertes cumulées des terres humides et des pertes des terres humides de la période passée.

$$WL_{t,r}^c = \min (WL_{t-1,r}^c + WL_{t-1,r}, WL_r^M)$$

La valeur des terres humides en $\$/km^2$ est fonction d'un paramètre de la valeur nette actualisée des bénéfiques futurs des terres humides, ν_{eau} , du ratio entre la production régionale par habitant, $y_{t,r}$, et une constante de normalisation, y_{norm} , de l'élasticité-revenu de la valeur des terres humides, β_{eau} , du ratio de la densité régionale de la population et d'une constante de normalisation, d_{norm} , de l'élasticité entre la densité de la population et la valeur des terres humides, γ_{dens} , et de la part des terres humides restantes depuis 1990 à l'exposant de l'élasticité-taille des terres humides, $\delta_{elataille}$.

$$VW_{t,r} = \nu_{eau} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{norm}} \right)^{\beta_{eau}} \left(\frac{\frac{P_{t,r}}{A_{t,r}}}{d_{norm}} \right)^{\gamma_{dens}} \left(\frac{WL_{1990,r} - WL_{t,r}^c}{WL_{1990,r}} \right)^{\delta_{elataille}}$$

La valeur nette actualisée de la perte des terres sèches dépend de l'élasticité-revenu de la valeur des terres sèches, ϵ_{rev} , et de la valeur des terres sèches, VD .

$$VANVD_{t,r} = \overline{D}_{t,r} VD_{t,r} \frac{1 + \rho + \eta g_{t,r}}{\rho + \eta g_{t,r} - \epsilon_{rev} d_{t,r}}$$

La valeur des terres sèches est fonction d'un paramètre ϕ_D , du ratio de la production régionale, Y , et de la surface régionale, A , (densité de la production) divisé par une constante de normalisation, YA_{norm} , et de l'élasticité-revenu de la valeur des terres sèches, ϵ_D .

$$VD_{t,r} = \phi \left(\frac{\frac{Y_{t,r}}{A_{t,r}}}{YA_{norm}} \right)^{\epsilon_D}$$

La surface régionale diminue avec les pertes des terres sèches.

$$A_{t,r} = A_{t-1,r} - D_{t-1,r}$$

Les coûts de la protection des côtes sont fonction de la proportion des terres protégées, d'un paramètre et de l'augmentation du niveau des mers depuis la dernière période.

$$coutsprot_{t,r} = prot_{t,r} paramprot_r \Delta S_t$$

Les coûts de la migration sont fonction d'un paramètre, de la production régionale par habitant et de la quantité de migrants. Cette équation est calibrée sur l'étude de Cline (Cline, 1992) sur les impacts des changements climatiques.

$$coutsmig_{t,r} = parammingy_{t,r} mig_{t,r}$$

Les dommages dus à l'intensification des tempêtes tropicales sont fonction d'un paramètre régional d'impact, α_{TD_r} , de la production régionale, $Y_{t,r}$, du ratio entre la production par

habitant régionale, $y_{t,r}$, et la production par habitant régionale en 1990, $y_{1990,r}$, de l'élasticité-revenu des dommages des tempêtes, ϵ_{TD} , d'un paramètre déterminant l'augmentation de la vitesse des vents des tempêtes par degré de réchauffement, δ_{TD} , de la température moyenne régionale, T , et d'un paramètre exponentiel, γ_{TD} . Cette équation est calibrée selon les données sur les dommages des tempêtes du Centre de recherche sur l'épidémiologie des désastres, les données sur l'impact du réchauffement climatique sur la vitesse des vents des tempêtes de l'Organisation météorologique mondiale et l'étude de Toya et Skidmore (Toya et Skidmore, 2007) sur l'élasticité-revenu des dommages de tempêtes.

$$TD_{t,r} = \alpha_{TD,r} Y_{t,r} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^{\epsilon_{TD}} [(1 + \delta_{TD} T_{t,r})^{\gamma_{TD}} - 1]$$

Les dommages dus à l'intensification des tempêtes extratropicales sont fonction d'un paramètre régional d'impact, $\alpha_{ETD,r}$, de la production régionale, $Y_{t,r}$, du ratio entre la production par habitant régionale, $y_{t,r}$, et la production par habitant régionale en 1990, $y_{1990,r}$, de l'élasticité-revenu des dommages des tempêtes, ϵ_{ETD} , d'un paramètre de sensibilité des tempêtes d'une région aux concentrations régionales de CO₂, $\delta_{ETD,r}$, du ratio entre la concentration atmosphérique de CO₂ actuelle, CO_{2t} , et la concentration atmosphérique de CO₂ préindustrielle, $CO_{2t_{PI}}$, et d'un paramètre exponentiel, γ . Cette équation est calibrée selon des sources similaires à celles de la dernière équation.

$$ETD_{t,r} = \alpha_{ETD,r} Y_{t,r} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^{\epsilon_{ETD}} \delta_{ETD,r} \left[\left(\frac{CO_{2t}}{CO_{2t_{PI}}} \right)^{\gamma_{ETD}} - 1 \right]$$

Dommages non-économiques

Les dommages hors-marché ou, pour emprunter la terminologie de la documentation officielle du FUND, les dommages non-économiques, sont composés de 6 éléments qui sont les impacts sur la biodiversité mesurée monétairement en \$ US 1995, VE , la valeur monétaire des décès causés par les changements climatiques en \$ US 1995, $coutsmorts$, la valeur monétaire des maladies causées par les changements climatiques en \$ US 1995, $coutsmal$, la valeur monétaire de l'impact sur le bien-être de la perte des terres humides en \$ US 1995, $coutsWL$, la valeur monétaire d'être forcé à émigrer par les circonstances climatiques en \$ US 1995, $coutsemig$, et les autres dommages hors-marché, $autpertesnoneco$. Cette dernière

composante n'a aucun effet dans le modèle de base.

$$\begin{aligned} pertesnoneco_{t,r} = & VE_{t,r} + coutsmorts_{t,r} + coutsmal_{t,r} + coutsWL_{t,r} \\ & + coutsemig_{t,r} + autpertesnoneco_{t,r} \end{aligned}$$

La valeur des écosystèmes dépend de la perception du public de l'état des écosystèmes. Plus la vitesse des changements climatiques est élevée, plus les impacts sont saillants. α_{VE} est un paramètre, $P_{t,r}$ est la population régionale, $y_{t,r}$ est la production régionale par habitant, λ_{br} est un paramètre régional, T_t est la température moyenne mondiale, ν_{VE} est un paramètre, σ_{VE} est un paramètre, B_t est la quantité d'espèces dans la période et B_0 est la quantité d'espèces en 2000. Cette équation est basée sur une étude de Tol (Tol, 2002a) qui analyse entre autres l'effet des changements climatiques sur la biodiversité et les études de Weitzman (Weitzman, 1992, 1993, 1998) et de Pearce et Moran (Pearce et Moran, 1994) sur la valorisation de la biodiversité.

$$VE_{t,r} = \alpha_{VE} P_{t,r} \frac{\frac{y_{t,r}}{\lambda_{Br}}}{1 + \frac{y_{t,r}}{\lambda_{Br}}} \frac{\frac{\Delta T_t}{\nu_{VE}}}{1 + \frac{\Delta T_t}{\nu_{VE}}} \left(1 - \sigma_{VE} + \sigma_{VE} \frac{B_0}{B_t} \right)$$

Le nombre d'espèces à une période est la valeur maximale entre 1% du nombre d'espèces en 2000 et une équation dépendant du nombre d'espèces de la période passée, B_{t-1} , du changement de la température moyenne globale depuis la période passée, ΔT et de paramètres ρ_B , γ_B et ν_{VE} .

$$B_t = \max \left\{ \frac{B_0}{100}, B_{t-1} \left(1 - \rho_B - \gamma_B \frac{\Delta T_t^2}{\nu_{VE}^2} \right) \right\}$$

La valeur des décès est la valeur statistique d'une vie multipliée par le nombre de décès.

$$coutsmorts_{t,r} = morts_{t,r} VSV_{t,r}$$

La valeur statistique d'une vie est fonction d'un paramètre α_{VSV} , du ratio de la production régionale par habitant actuelle, $y_{t,r}$, et d'une constante de normalisation, y_{vnorm} , et de l'élasticité-revenu de la valeur statistique d'une vie. Cette équation est calibrée sur Cline (Cline, 1992) qui suppose que la valeur statistique d'une vie est 200 fois la production par habitant.

$$VSV_{t,r} = \alpha_{VSV} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{vnorm}} \right)^{\epsilon_{VSV}}$$

Le nombre des décès est la somme des décès causés par l'augmentation des maladies transmises par vecteur (paludisme, schistosomiase, dengue), des décès causés par l'augmentation

des maladies cardiovasculaires dus aux périodes de chaleur intense pour les personnes âgées de moins de 65 ans et pour les personnes âgées de plus de 65 ans, des décès causés par l'augmentation des maladies cardiovasculaires dus aux périodes de froid intense pour les personnes âgées de moins de 65 ans et pour les personnes âgées de plus de 65 ans, des décès causés par l'augmentation des maladies respiratoires, des décès causés par l'augmentation de la diarrhée, des décès causés par l'intensification des tempêtes tropicales et des décès causés par l'intensification des tempêtes extratropicales.

$$morts_{t,r} = \sum_{v=1}^3 D_{t,r}^v + \sum_{c=1}^3 D_{t,r}^c + \sum_{f=1}^2 D_{t,r}^f + D_{t,r}^d + TM_{t,r} + ETM_{t,r} + autmort_{t,r}$$

Les décès additionnels dus aux maladies transmises par vecteur sont fonction de la mortalité des maladies transmises par vecteur en 2000, $D_{1990,r}^v$, de la population régionale, $P_{t,r}$, d'un paramètre d'impact des changements climatiques sur les maladies transmises par vecteur, $\alpha_{vec,r}^v$, de la température régionale moyenne actuelle, $T_{t,r}$, et en 1990, $T_{1990,r}$, d'un paramètre β_{vec} , de la production régionale par habitant actuelle, $y_{t,r}$, et en 1990, $y_{1990,r}$, et de l'élasticité-revenu de la mortalité des maladies transmises par vecteur.

$$D_{t,r}^v = D_{1990,r}^v P_{t,r} \alpha_{vec,r}^v (T_{t,r} - T_{1990,r})^{\beta_{vec}} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^{\gamma_{vec}}$$

Les décès additionnels causés par les maladies cardiovasculaires dues aux périodes de chaleur intense pour les personnes âgées de moins de 65 ans et pour les personnes âgées de plus de 65 ans ainsi que ceux causés par les maladies respiratoires sont supposés limités aux zones urbaines. Ceux-ci sont fonction de la population régionale, $P_{t,r}$, de la part régionale de la population urbaine, $U_{t,r}$, de la température régionale moyenne, T et des paramètres α^c et β^c .

$$D_{t,r}^c = P_{t,r} U_{t,r} (\alpha^c T_{t,r} + \beta^c T_{t,r}^2)$$

La part régionale de la population urbaine est fonction de la production régionale par habitant, y , de la densité régionale de la population et des paramètres α_{urb} et β_{urb} .

$$U_{t,r} = \frac{\alpha_{urb} \sqrt{y_{t,r}} + \beta_{urb} \sqrt{\frac{P_{t,r}}{A_{t,r}}}}{1 + \alpha_{urb} \sqrt{y_{t,r}} + \beta_{urb} \sqrt{\frac{P_{t,r}}{A_{t,r}}}}$$

Les décès additionnels causés par les maladies cardiovasculaires dues aux périodes de froid intense pour les personnes âgées de moins de 65 ans et pour les personnes âgées de plus de

65 ans dépendant de variables et paramètres similaires à l'équation ci-dessus, mais ne sont plus limités aux populations urbaines.

$$D_{t,r}^f = P_{t,r} (\alpha^f T_{t,r} + \beta^f T_{t,r}^2)$$

Les décès additionnels causés par la diarrhée sont fonction du taux de mortalité régional de la diarrhée en 2000, μ_r^d , de la population, P , du ratio de la production régionale par habitant actuelle, $y_{t,r}$, et de la production régionale par habitant en 1990, $y_{1990,r}$ à l'exposant de l'élasticité-revenu de la mortalité de la diarrhée, ϵ_{diar} , et du ratio de la température régionale actuelle, $T_{t,r}$, et de la température régionale préindustrielle, $T_{PI,r}$ à l'exposant d'un paramètre de réponse de la mortalité de la diarrhée aux changements climatiques, η_{diar} .

$$D_{t,r}^d = \mu_{t,r}^d P_{t,r} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^{\epsilon_{diar}} \left(\frac{T_{t,r}}{T_{PI,r}} \right)^{\eta_{diar}}$$

L'équation déterminant les décès dus à l'intensification des tempêtes tropicales a une forme similaire à l'équation déterminant les dommages des tempêtes tropicales. β_{TM_r} est la mortalité de base des tempêtes tropicales, alors que les autres paramètres sont identiques à l'équation des dommages.

$$TM_{t,r} = \beta_{TM_r} P_{t,r} Y_{t,r} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^{\eta_{TM}} [(1 + \delta_{TM} T_{t,r})^{\gamma_{TM}} - 1]$$

L'équation déterminant les décès dus à l'intensification des tempêtes extratropicales a une forme similaire à l'équation déterminant les dommages des tempêtes extratropicales. β_{ETM_r} est la mortalité de base des tempêtes extratropicales, alors que les autres paramètres sont identiques à l'équation des dommages.

$$ETM_{t,r} = \beta_{ETM_r} Y_{t,r} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^{\phi_{ETM}} \delta_{ETM_r} \left[\left(\frac{CO2_t}{CO2_{t_{PI}}} \right)^{\gamma_{ETM}} - 1 \right]$$

La valeur des maladies causées par les changements climatiques est la valeur statistique d'une année de vie de maladie multipliée par le nombre de personnes malades.

$$couts_{mal_{t,r}} = mal_{t,r} VSM_{t,r}$$

La valeur statistique d'une année de vie de maladie est fonction d'un paramètre β_{VSM} et du ratio du revenu régional par habitant, $y_{t,r}$, et d'une constante de normalisation, y_{vnorm} , à l'exposant de l'élasticité-revenu de la valeur d'une année de vie de maladie. Cette équation est calibrée sur une étude de Navrud (Navrud, 2001) sur la valorisation des impacts de la

pollution sur la santé qui estime qu'une année de vie en morbidité vaut 80% du revenu annuel par habitant.

$$VSM_{t,r} = \beta_{VSN} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{vnorm}} \right)^{\eta_{VSM}}$$

La morbidité additionnelle de la diarrhée est exprimée de manière similaire à l'équation de $D_{t,r}^d$, hormis l'élasticité-revenu de la morbidité de la diarrhée, $\epsilon_{maldiar}$, et le paramètre de réponse de la morbidité de la diarrhée aux changements climatiques, $\eta_{maldiar}$.

$$Dmal_{t,r}^d = \mu_{t,r}^d P_{t,r} \left(\frac{y_{t,r}}{y_{1990,r}} \right)^{\epsilon_{maldiar}} \left(\frac{T_{t,r}}{T_{PI,r}} \right)^{\eta_{maldiar}}$$

La morbidité additionnelle des autres types de maladies est proportionnelle à la mortalité additionnelle des autres types de maladies.

$$Dmal_{t,r}^f = Dmalparam_{t,r}^f D_{t,r}^f$$

$$Dmal_{t,r}^c = Dmalparam_{t,r}^c D_{t,r}^c$$

$$Dmal_{t,r}^v = Dmalparam_{t,r}^v D_{t,r}^v$$

La valorisation des terres humides est le produit des pertes des terres humides et de la valorisation de ces terres humides.

$$coutsWL_{t,r} = WL_{t,r} VW_{t,r}$$

Les couts de l'émigration sont proportionnels à un paramètre $paramemig$, à la production régionale par habitant, y , et au nombre d'émigrés, $emig_{t,r}$.

$$coutsemig_{t,r} = paramemigy_{t,r} emig_{t,r}$$

Température et niveau des mers

La température moyenne globale est déterminée par un paramètre, Φ , la température moyenne globale de la période passée, la sensibilité climatique, CS , et le niveau de forçage radiatif, $Forc$. Le paramètre Φ est lui-même gouverné par les paramètres α , β^l et β^q ainsi que par la sensibilité climatique.

$$T_t = \left(1 - \frac{1}{\Phi} \right) T_{t-1} + \frac{1}{\Phi} \frac{CS}{5,35 \ln(2)} Forc_t \quad \text{où } \Phi = \max \{ \alpha + \beta^l CS + \beta^q CS^2, 1 \}.$$

La température moyenne régionale est obtenue en multipliant la température moyenne globale par un facteur régional, $pregtemp_r$, additionnant le paramètre $scentemp$ à ce facteur et divisant le tout par le premier facteur. Cette équation est calibrée sur une étude de Mendelsohn et al. (Mendelsohn et al., 2000) comparant les impacts des changements climatiques estimés par 14 modèles climatiques.

$$T_{t,r} = \frac{pregtemp_r T_t + scentemp_{t,r}}{pregtemp_r}$$

Le forçage radiatif dépend de la concentration de CO₂, de CH₄, de N₂O, de SF₆ et de SO₂ dans l'atmosphère. L'équation qui suit a été calibrée sur les études de Ramaswamy et al. (Ramaswamy et al., 2001) et de Forster et al. (Forster et al., 2007) sur le forçage radiatif.

$$\begin{aligned} Forc_t = & 5,35 \ln \left(\frac{CO_{2t}}{275} \right) + 0,036 * 1,4 \left(\sqrt{CH_{4t}} - \sqrt{790} \right) + 0,12 \left(\sqrt{N_2O_t} - \sqrt{285} \right) - \\ & 0,47 \ln \left(1 + 2,01 * 10^{-5} CH_{4t}^{0,75} 285^{0,75} + 5,31 * 10^{-15} CH_{4t}^{2,52} * 285^{1,52} \right) - \\ & 0,47 \ln \left(1 + 2,01 * 10^{-5} * 790^{0,75} * N_2O_t^{0,75} + 5,31 * 10^{-15} * 790^{2,52} N_2O_t^{1,52} \right) + \\ & 2 * 0,47 \ln \left(1 + 2,01 * 10^{-5} * 790^{0,75} * 285^{0,75} + 5,31 * 10^{-15} * 790^{2,52} * 285^{1,52} \right) + \\ & 0,00052 (SF_{6t} - 0,04) + Forc_{SO_{2t}} \end{aligned}$$

Le niveau des mers est fonction d'un paramètre, ρ_{efold} , du niveau des mers de la période passée, d'un paramètre de la sensibilité du niveau des mers à la température, γ_{sens} , et de la température globale. La montée du niveau des mers réduit la surface des terres sèches et humides et affecte les coûts de la protection côtière.

$$S_t = \left(1 - \frac{1}{\rho_{efold}} \right) S_{t-1} + \gamma_{sens} \frac{1}{\rho_{efold}} T_t$$

Émissions

La concentration de CH₄ dans l'atmosphère dépend de la concentration de CH₄ dans l'atmosphère de la période passée, d'une part α_{CH_4} des émissions de CH₄, E_{CH_4} , et du produit d'un paramètre β_{CH_4} et de la différence entre la concentration de CH₄ dans l'atmosphère la période passée et la concentration préindustrielle de CH₄.

$$CH_{4t} = CH_{4t-1} + \alpha_{CH_4} E_{CH_4} - \beta_{CH_4} (CH_{4t-1} - CH_{4PI})$$

Les émissions de CH₄ sont la somme des émissions régionales de CH₄ exogènes réduites par la politique de réduction des émissions de CH₄ en vigueur la période passée, $\tau_{CH_4_{t-1,r}}$.

$$E_{CH_4_t} = \sum_{r=1}^{16} (1 - \tau_{CH_4_{t-1,r}})$$

Le paramètre de politique de réduction des émissions de CH₄ dépend des émissions de CH₄, de la production régionale et des paramètres régionaux $CH_4param1$, $CH_4param2$ et $taxCH_4$.

$$\tau_{CH_4_{t,r}} = \frac{taxCH_4_{t,r} E_{CH_4_{t,r}}}{2CH_4param1_r CH_4param2_r^2 Y_{t,r}}$$

Les équations pertinentes aux concentrations atmosphériques de N₂O sont analogues à celles pertinentes aux concentrations atmosphériques de NH₄.

$$N_2O_t = N_2O_{t-1} + \alpha_{N_2O_t} - \beta_{N_2O} (N_2O_{t-1} - N_2O_{PI})$$

$$E_{N_2O_t} = \sum_{r=1}^{16} (1 - \tau_{N_2O_{t-1,r}})$$

$$\tau_{N_2O_{t,r}} = \frac{taxN_2O_{t,r} E_{N_2O_{t,r}}}{2N_2Oparam1_r N_2Oparam2_r^2 Y_{t,r}}$$

Les émissions de SF₆ ne peuvent pas être réduites et leurs émissions régionales sont proportionnelles à la production régionale et à la production régionale par habitant.

$$SF_6_t = SF_6_{PI} + (SF_6_{t-1} - SF_6_{PI}) (1 - \beta_{SF_6}) + \alpha_{SF_6} E_{SF_6_t}$$

$$E_{SF_6_t} = \sum_{r=1}^{16} SF_6init_r + SF_6param1 (Y_{t,r} - Y_{1990,r}) + SF_6param2 (y_{t-1,r} - y_{1990,r}) SF_6param3_t$$

La concentration atmosphérique de CO₂ suit un modèle à cinq boîtes, où les émissions de CO₂ sont allouées en cinq parts différentes dans des "boîtes" qui dissipent le CO₂ à des taux différents. Cette équation s'inspire des études de Maier-Reimer et Hasselmann (Maier-Reimer et Hasselmann, 1987) et de Hammitt et al. (Hammitt et al., 1992) sur le cycle du carbone.

$$CO_{2_t} = \sum_{i=1}^5 \Lambda_i Boite_{i,t} + 0,000471 \alpha_{frac_i} E_{CO_{2_t}}$$

Les émissions de CO₂ sont la somme des émissions de la biosphère et des émissions humaines endogènes ainsi que des émissions humaines dues à l'utilisation des terres exogènes de toutes les régions.

$$E_{CO_2t} = E_{C_t}^B + \sum_{r=0}^{16} \left(E_{CO_2t,r}^H + E_{CO_2t,r}^T \right)$$

Les émissions de la biosphère sont fonction de la température globale moyenne de la période passée, T_{t-1} , relative à la température globale moyenne en 2010, T_{2010} , un paramètre β_E et du ratio de la biomasse de la période passée et de la biomasse maximale pouvant générer des émissions.

$$E_{C_t}^B = \beta_E (T_{t-1} - T_{2010}) \frac{Biom_{t-1}}{Biom_{init}}$$

La quantité de biomasse est la biomasse de la période passée qui n'a pas pris la forme d'émissions atmosphériques. Cette valeur est au moins nulle.

$$Biom_t = \max \{ Biom_{t-1} - E_{C_t}^B, 0 \}$$

Les émissions humaines endogènes dépendent de l'intensité carbonique de l'utilisation de l'énergie, Ψ , de la politique de réduction de l'intensité carbonique de l'utilisation de l'énergie, χ^Ψ , de l'intensité énergétique de la production, Φ , de la politique de réduction de l'intensité énergétique de la production, χ^ϕ , et du PIB régional, Y . Les détails sont présentés en annexe.

$$E_{CO_2t,r}^H = \left(\Psi_{t,r} - \chi_{t,r}^\Psi \right) \left(\phi_{t,r} - \chi_{t,r}^\phi \right) Y_{t,r}$$

L'intensité carbonique de l'utilisation de l'énergie est fonction de la croissance autonome dans l'efficacité énergétique de la période passée, $g_{t-1,r}^\Psi$, l'intensité carbonique de l'utilisation de l'énergie de la période passée, d'un paramètre α et du paramètre de la politique de réduction des émissions de CO₂, $\tau_{CO_2t-1,r}$.

$$\Psi_{t,r} = g_{t-1,r}^\Psi \Psi_{t-1,r} - \alpha_{t-1,r} \tau_{CO_2t-1,r}$$

La politique de réduction de l'intensité carbonique de l'utilisation de l'énergie est fonction d'un paramètre κ_{Psi} , de la politique de réduction de l'intensité carbonique, de l'utilisation de l'énergie de la période passée, d'un paramètre α et du paramètre de la politique de réduction des émissions de CO₂.

$$\chi_{t,r}^\Psi = \kappa_{Psi} \chi_{t-1,r}^\Psi + (1 - \alpha_{t-1,r}) \tau_{CO_2t-1,r}$$

L'intensité énergétique de la production est fonction de la croissance autonome dans l'efficacité énergétique la période passée, $g_{t-1,r}^\phi$, l'intensité énergétique de la production de la période passée, d'un paramètre α et du paramètre de la politique de réduction des émissions de CO₂.

$$\phi_{t,r} = g_{t-1,r}^\phi \phi_{t-1,r} - \alpha_{t-1,r} \tau_{CO_2 t-1,r}$$

La politique de réduction de l'intensité énergétique de la production est fonction d'un paramètre κ_{phi} , de la politique de réduction de l'intensité carbonique de l'utilisation de l'énergie de la période passée, d'un paramètre α et du paramètre de la politique de réduction des émissions de CO₂.

$$\chi_{t,r}^\phi = \kappa_{phi} \chi_{t-1,r}^\phi + (1 - \alpha_{t-1,r}) \tau_{CO_2 t-1,r}$$

Coûts de mitigation

Le paramètre de la politique de réduction des émissions qui affecte les émissions et les coûts de mitigation dépend des émissions humaines endogènes, $E_{CO_2}^H$, du stock régional, H , et mondial, H^g , dans la connaissance en matière de mitigation des émissions, du PIB régional, Y , et des paramètres $taxCO_2$ et β .

$$\tau_{CO_2 t,r} = \frac{taxCO_2 t,r E_{CO_2 t,r}^H H_{t-1,r} H_{t-1}^g}{2\beta_{t,r} Y_{t,r}}$$

Le paramètre β est fonction des émissions régionales par unité de production régionale et des émissions régionales par unité de production régionale de la région la moins polluante.

$$\beta_{t,r} = 0.784 - 0,084 \sqrt{\frac{E_{CO_2 t,r}^H}{Y_{t,r}} - \min_s \frac{E_{CO_2 t,s}^H}{Y_{t,s}}}$$

Le stock régional et le stock mondial dans la connaissance en la matière de mitigation des émissions sont comme suit, avec les paramètres γ_R et γ_G déterminant la portion du stock de connaissance de la période passée restant dans la région la période suivante. Cette spécification s'inspire de celle de Goulder et Schneider (Goulder et Schneider, 1999) et celle de Goulder et Mathai (Goulder et Mathai, 2000) issues de modèles d'équilibre général illustrant le choix optimal des firmes dans la recherche et développement.

$$H_{t,r} = H_{t-1,r} \sqrt{1 + \gamma_R \tau_{CO_2 t-1,r}}$$

$$H_t^g = H_{t-1}^g \sqrt{1 + \gamma_G \tau_{CO_2, t-1, r}}$$

Les coûts de la réduction des émissions de CO₂ sont fonction du paramètre $\beta_{t,r}$ susmentionné, du paramètre de la politique de réduction des émissions de CO₂, τ_{CO_2} , et du stock régional, H , et mondial, H^g , dans la connaissance en matière de mitigation des émissions. Si on remarque que le paramètre $\beta_{t,r}$ est plus élevé pour les régions dont l'intensité des émissions dans la production $\frac{E}{Y}$ est plus proche de celle de la région qui pollue le moins, on constate qu'il est plus coûteux pour les régions qui polluent déjà peu de réduire davantage leurs émissions. En outre, plus la politique de réduction des émissions est sévère, plus les coûts sont élevés. Cependant, la réduction des émissions permet d'accumuler du stock de connaissance en matière de mitigation des émissions, ainsi réduisant les coûts.

$$P_{CO_2, t, r} = \frac{\beta_{t,r} \tau_{CO_2, t, r}^2}{H_{t,r} H_t^g}$$

Les coûts de la réduction des émissions de CH₄ et de N₂O sont des fonctions quadratiques avec paramètres régionaux qui dépendent des paramètres de politique de réduction des émissions de CH₄ et de N₂O.

$$P_{CH_4, t, r} = CH_4param1_r CH_4param2_r^2 \tau_{CH_4, t, r}^2$$

$$P_{N_2O, t, r} = N_2Oparam1_r N_2Oparam2_r^2 \tau_{N_2O, t, r}^2$$

Les coûts de réduction des émissions sont une fonction d'un paramètre régional $taxmp_r$, des coûts de réduction des émissions de gaz carbonique, des coûts de la réduction des émissions de méthane et des coûts de la réduction des émissions d'oxyde nitreux dans la région.

$$coutsred_{t,r} = (taxmp_r P_{CO_2, t, r} + P_{CH_4, t, r} + P_{N_2O, t, r})$$

A.3 Le modèle PAGE

Publié en 2019, le modèle PAGE-ICE (Policy Analysis of the Greenhouse Effect, Ice, Climate, Economics) est la version la plus à jour du modèle PAGE. Par souci de clarté et de concision, nous nous limitons à sommairement décrire le modèle à l'aide de la documentation technique du PAGE09 (Hope, 2011) et du PAGE-ICE (Yumashev, 2019) ainsi qu'à l'aide du code Julia de PAGE-ICE disponible sur GitHub.

PAGE est un modèle stochastique à 8 régions (tableau 17 de l'annexe A.4 et graphique 10 de l'annexe A.5), à plus de 160 variables et paramètres incertains décrits par des distributions de probabilité évaluant les impacts des changements climatiques causés par les émissions de trois gaz à effet de serre (gaz carbonique, méthane et oxyde nitreux) et de trois catégories de gaz à effet de serre (gaz à effets linéaires, aérosols sulfatés et autres). PAGE considère l'augmentation du forçage radiatif dû à la réduction de l'albedo de la surface terrestre causée par la fonte des glaces. Le modèle prend aussi en compte le gaz carbonique libéré par la fonte du pergélisol à l'aide d'une moyenne des émissions projetées par les modèles SiBCASA (Simple Biosphere Carnegie-Ames-Stanford Approach) et JULES (Joint UK Land Environment Simulator). Les impacts s'expriment en pourcentage de la production d'une région. À la différence des modèles précédents, PAGE modélise explicitement les impacts des discontinuités climatiques dont la présence est déterminée de manière aléatoire. Toutefois, il n'inclut pas une taxe sur les gaz à effet de serre de manière directe dans ses équations. La mitigation des émissions s'exprime plutôt implicitement à travers un sentier d'émissions exogène. Outre les dommages des discontinuités climatiques, PAGE modélise les dommages économiques, les dommages hors-marché et les dommages de la montée du niveau des mers. Chaque région peut investir dans la réduction des émissions qui permet d'éviter les impacts des changements climatiques et dans l'adaptation aux changements climatiques qui permet de réduire les impacts des changements climatiques. Similairement au modèle FUND, la croissance de la production est exogène dans PAGE. Tout comme pour le modèle DICE, l'évolution de la population est exogène dans PAGE. Nous passons maintenant à la description des composantes du modèle.

Économie

La fonction objectif implicite dans PAGE est la consommation par habitant, qui est réduite par les quatre types d'impacts climatiques et ensuite par les coûts d'adaptation et les coûts de réduction des émissions. La consommation nette par habitant, $cnet$, est la consommation après impacts hors-marché par habitant, cne , moins la part de la production après impacts hors-marchés affectée par les impacts des discontinuités.

$$cnet_{t,r} = cne_{t,r} - idis_{t,r} PIBne_{t,r} \quad \text{où} \quad PIBne_{t,r} = \frac{cne_{t,r}}{1 - S}$$

La consommation après impacts hors-marché par habitant, cne , est la consommation après impacts économiques par habitant, ce , moins la part de la production après impacts écono-

miques affectée par les impacts hors-marché.

$$cne_{t,r} = ce_{t,r} - ine_{t,r}PIBe_{t,r} \quad \text{où} \quad PIBe_{tr} = \frac{ce_{t,r}}{1 - S}$$

La consommation après impacts économiques par habitant, ce , est la consommation après impacts de la montée du niveau des mers par habitant, cnm , moins la part de la production après impacts de la montée du niveau des mers affectée par les impacts économiques.

$$ce_{t,r} = cnm_{t,r} - ie_{t,r}PIBnm_{t,r} \quad \text{où} \quad PIBnm_{t,r} = \frac{cnm_{t,r}}{1 - S}$$

La consommation après impacts de la montée du niveau des mers par habitant, cnm , est la consommation après les coûts de réduction des émissions et d'adaptation aux changements climatiques par habitant, $ccouts$, moins la part de la production après imposition des coûts de réduction des émissions et d'adaptation aux changements climatiques affectée par les impacts de la montée du niveau des mers.

$$cnm_{t,r} = ccouts_{t,r} - inm_{t,r}PIBc_{t,r} \quad \text{où} \quad PIBc_{t,r} = \frac{ccouts_{t,r}}{1 - S}$$

Dans toutes les équations précédentes, le taux d'épargne, S , est exogène. La consommation après imposition des coûts de réduction des émissions et d'adaptation aux changements climatiques par habitant, $ccouts$, est la consommation brute par habitant, c , moins les coûts de réduction des émissions par habitant, $cred$, et les coûts d'adaptation aux changements climatiques par habitant, $cadap$.

$$ccouts_{t,r} = c_{t,r} - cred_{t,r} - cadap_{t,r}$$

La consommation brute par habitant, c , est fonction de la production et de la population qui suivent tous deux un sentier exogène.

$$c_{t,r} = \frac{C_{t,r}}{Pop_{t,r}} \quad \text{où} \quad C_{t,r} = PIB_{t,r}(1 - S)$$

avec

$$PIB_{t,r} = PIB_{t-1,r}(1 + crPIB_{t,r})^{annee_t - annee_{t-1}} \quad \text{et} \quad Pop_{t,r} = Pop_{t-1,r}(1 + crPop_{t,r})^{annee_t - annee_{t-1}} .$$

Coûts de mitigation

Les coûts de réduction des émissions par habitant, $cred$, sont les coûts de réduction des émissions, $Cred$, divisés par la population régionale. Les coûts de réduction des émissions, $Cred$, sont la somme des coûts de réduction du CO₂, $Credco2$, du CH₄, $Credch4$, du N₂O. $Credn2o$ et des gaz à effets linéaires, $Credlin$.

$$cred_{t,r} = \frac{Cred_{t,r}}{Pop_{t,r}} \quad \text{où} \quad Cred_{t,r} = Credco2_{t,r} + Credn2o_{t,r} + Credch4_{t,r} + Credlin_{t,r}.$$

Les valeurs calculées par PAGE-ICE suivent une courbe des coûts marginaux de réduction des émissions calibrée selon les études de McKinsey (McKinsey, 2009) et Aldy et al. (Aldy et al., 2016). L'augmentation du niveau des connaissances en matière de réduction des émissions réduit le coût marginal de la réduction des émissions. Le niveau des connaissances en matière de réduction des émissions respecte les études de Rubin et al. (Rubin et al., 2015) sur le taux d'apprentissage dans la production électrique.

Coûts d'adaptation

Les coûts d'adaptation par habitant, $cadap$, sont les coûts d'adaptation, $Cadap$, divisés par la population régionale. Les coûts d'adaptation, $Cadap$, sont séparés en coûts économiques d'adaptation, $Cadape$, en coûts hors-marché d'adaptation, $Cadapne$, et en coûts d'adaptation à la montée du niveau des mers, $Cadapnm$. Le modèle ne permet pas l'adaptation aux effets discontinus des changements climatiques qui sont par leur nature imprévisibles.

$$Cadap_{t,r} = Cadap_{t,r,e} + Cadap_{t,r,ne} + Cadap_{t,r,nm}$$

Chaque région peut investir dans deux types d'adaptation pour minimiser un impact de type d . L'adaptation de type plateau CP permet d'éliminer tous les impacts tant qu'ils ne dépassent pas un certain seuil de sévérité alors que l'adaptation de type impact CI permet de réduire les impacts quand ils surviennent.

$$Cadap_{t,r,d} = CP_{t,r,d} + CI_{t,r,d}$$

Les coûts d'adaptation de type plateau, CP , sont exprimés en fonction d'un paramètre de tolérance, $tolniv$, d'une proportion $CPfrac$ des coûts d'adaptation de type plateau de la

région de référence qui est l'Union européenne, $CPUE$, de la production, PIB , et d'une fraction de progrès technologique autonome $autofacfrac$ qui réduit les coûts d'adaptation.

$$CP_{t,r,d} = tol_{niv_{t,r,d}} CPfrac_{r,d} CPUE_d PIB_{t,r} autofacfrac_{t,d}$$

Les coûts d'adaptation de type impact, CI , sont exprimés en fonction d'un paramètre $adapimp$, d'une proportion $CIfrac$ des coûts d'adaptation de type impact de la région de référence qui est l'Union européenne, $CIUE$, de la production, PIB , d'un paramètre de capacité maximale d'adaptation, $impmax$, et d'une fraction de progrès technologique $autofacfrac$ qui réduit les coûts d'adaptation.

$$CI_{t,r,d} = adapimp_{t,r,d} CIfrac_{r,d} CPUE_d PIB_{t,r} dimpax_{r,d} autofacfrac_{t,d}$$

Dommages

Les différents impacts dépendent du niveau des deux types de protection et sont ajustés pour ne pas dépasser 30% du PIB. L'apparition d'impacts des discontinuités climatiques est aléatoire, mais devient plus probable lorsque la température moyenne mondiale excède un certain seuil de tolérance. Si des impacts surviennent à une période, ils persistent aux périodes suivantes et se dissipent progressivement. Les autres types d'impacts sont minimisés par les deux types d'adaptation. Comparativement à la version antérieure du PAGE, PAGE-ICE inclut de nouvelles équations de dommages économiques calibrés sur l'étude de Burke et al. (Burke et al., 2015) sur l'effet des chocs de température sur la production. Tous les impacts sont agrégés dans le temps avec un taux d'escompte dans l'espace et avec une pondération d'équité qui donne plus de poids aux régions plus pauvres en termes de consommation par habitant que la région de référence, qui est ici l'Union européenne.

Température et niveau des mers

Le niveau des mers dépend du niveau des mers initial, du niveau des mers à l'équilibre et du temps de réponse du niveau des mers aux changements climatiques. Le niveau des mers à l'équilibre dépend à son tour de la sensibilité du niveau des mers à la croissance de la température, de la température moyenne mondiale et du niveau des mers préindustriel.

La température mondiale dépend en grande partie de la sensibilité climatique et de l'effet albedo. Au lieu d'être un paramètre comme dans les modèles précédents, la sensibilité

climatique est déterminée par une équation liant la réponse climatique transitoire à un paramètre de temps de réponse climatique. Les paramètres de l'effet albedo dépendent de la température mondiale. La température régionale est la température mondiale multipliée par un facteur régional d'amplification.

Émissions

Le CO₂, le CH₄, le N₂O, les gaz à effets de serre linéaires, les aérosols sulfatés et les autres gaz à effet de serre contribuent au niveau de forçage radiatif. Le forçage radiatif et les concentrations de ces gaz sont déterminés selon des équations calibrées sur des données historiques et des projections. Une part du CO₂ est naturellement absorbée par les terres et par les océans. La fonte des pergélisols libère du CO₂ et du CH₄ additionnel. Une moyenne des projections des modèles SiBCASA (Simple Biosphere Carnegie-Ames-Stanford Approach) et JULES (Joint UK Land Environment Simulator) est utilisée pour déterminer les émissions additionnelles de CO₂ et de CH₄.

A.4 Tableaux

Tableau 16 – Régions du monde pour le modèle FUND 3.9

Région	Pays
États-Unis	États-Unis
Canada	Canada
Europe de l'ouest	Allemagne, Andorre, Autriche, Belgique, Chypre, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Islande, Irlande, Italie, Liechtenstein, Luxembourg, Malte, Monaco, Norvège, Pays-Bas, Portugal, Royaume-Uni, Saint-Marin, Suède, Suisse
Corée du Sud et Japon	Corée du Sud, Japon
Australie et Nouvelle-Zélande	Australie, Nouvelle-Zélande
Europe centrale et Europe de l'est	Albanie, Bosnie-Herzégovine, Bulgarie, Croatie, Hongrie, Macédonie, Pologne, République tchèque, Roumanie, Slovaquie, Slovénie, Yougoslavie
États post-soviétiques	Arménie, Azerbaïdjan, Biélorussie, Éstonie, Géorgie, Kazakhstan, Kirghizistan, Lettonie, Lituanie, Moldavie, Russie, Tadjikistan, Turkménistan, Ukraine, Ouzbékistan
Moyen-Orient	Arabie saoudite, Bahreïn, Cisjordanie et Gaza, Émirats arabes unis, Iran, Irak, Israël, Jordanie, Koweït, Liban, Oman, Qatar, Syrie, Turquie, Yémen
Amérique centrale	Belize, Costa Rica, Guatemala, Honduras, Mexique, Nicaragua, Panama, Salvador
Amérique du sud	Argentine, Bolivie, Brésil, Chili, Colombie, Équateur, Guyana, Guyane, Paraguay, Pérou, Suriname, Uruguay, Venezuela
Asie du sud	Afghanistan, Bangladesh, Bhoutan, Inde, Népal, Pakistan, Sri Lanka
Asie du sud-est	Birmanie, Brunei, Cambodge, Indonésie, Laos, Malésie, Papouasie-Nouvelle-Guinée, Philippines, Singapour, Taïwan, Thaïlande, Timor oriental, Vietnam
Chine	Chine, Corée du Nord, Hong Kong, Macao, Mongolie
Afrique du nord	Algérie, Égypte, Libye, Maroc, Tunisie, Sahara occidental
Afrique subsaharienne	Afrique du Sud, Angola, Bénin, Botswana, Burkina Faso, Burundi, Cameroun, Cap-Vert, Congo-Brazza, Congo-Kinshasa, Côte d'Ivoire, Djibouti, Érythrée, Éthiopie, Gabon, Gambie, Ghana, Guinée-Bissau, Guinée équatoriale, Kenya, Lesotho, Libéria, Madagascar, Malawi, Mali, Mauritanie, Mozambique, Namibie, Niger, Nigeria, Ouganda, République centrafricaine, Rwanda, Sénégal, Sierra Leone, Somalie, Soudan, Swaziland, Tanzanie, Tchad, Togo, Zambie, Zimbabwe
Petits états insulaires	Antigua-et-Barbuda, Antilles néerlandaises, Aruba, Bahamas, Barbade, Comores, Cuba, Fidji, Dominique, Grenade, Guadeloupe, Haïti, Îles Marshall, Île Maurice, Îles Salomon, Îles Vierges, Jamaïque, Kiribati, Maldives, Martinique, Micronésie, Nauru, Nouvelle-Calédonie, Palaos, Polynésie, Porto Rico, Polynésie française, République dominicaine, Réunion, Samoa, Saint-Christophe-et-Niévès, Sainte-Lucie, Sao Tomé-et-Principe, Saint-Vincent-et-les-Grenadines, Seychelles, Tonga, Trinité-et-Tobago, Tuvalu, Vanuatu

Source : Documentation technique du modèle FUND 3.9

Tableau 17 – Régions du modèle PAGE-ICE

Région	Pays
Europe	Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Chypre, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Italie, Lettonie, Lituanie, Luxembourg, Malte, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République tchèque, Roumanie, Royaume-Uni, Slovaquie, Slovénie, Suède
États post-soviétiques et reste de l'Europe	Albanie, Arménie, Azerbaïdjan, Biélorussie, Bosnie-Herzégovine, Croatie, Géorgie, Islande, Kazakhstan, Kirghizistan, Macédoine, Moldavie, Mongolie, Monténégro, Russie, Serbie, Tadjikistan, Turkménistan, Ukraine, Ouzbékistan
États-Unis	États-Unis
Chine et Pacifique	Birmanie, Cambodge, Chine, Corée du Nord, Hong Kong, Laos, Vietnam
Inde et Asie du Sud-Est	Afghanistan, Bangladesh, Bhoutan, Brunei, Corée du Sud, Fiji, Îles Salomon, Inde, Indonésie, Kiribati, Malaisie, Maldives, Népal, Pakistan, Papouasie-Nouvelle-Guinée, Philippines, Samoa, Singapour, Sri Lanka, Taïwan, Thaïlande, Timor occidental, Tonga, Vanuatu
Afrique et Moyen-Orient	Afrique du Sud, Algérie, Angola, Arabie saoudite, Bahreïn, Bénin, Botswana, Burkina Faso, Burundi, Cameroun, Cap-Vert, Comores, Congo-Brazza, Congo-Kinshasa, Côte d'Ivoire, Djibouti, Égypte, Émirats arabes unis, Érythrée, Éthiopie, Gabon, Gambie, Ghana, Guinée, Guinée-Bissau, Guinée équatoriale, Île Maurice, Iran, Irak, Israël, Jordanie, Kenya, Koweït, Liban, Madagascar, Malawi, Mali, Mauritanie, Maroc, Mozambique, Namibie, Niger, Nigeria, Oman, Ouganda, Qatar, Rwanda, Sao Tomé-et-Principe, Sénégal, Seychelles, Sierra Leone, Somalie, Soudan, Swaziland, Syrie, Tanzanie, Territoires palestiniens occupés, Togo, Tunisie, Yémen, Zambie, Zimbabwe
Caraïbes et Amérique latine	Antigua-et-Barbuda, Argentine, Bahamas, Barbade, Belize, Bolivie, Brésil, Chili, Colombie, Costa Rica, Cuba, Dominique, Équateur, Grenade, Guatemala, Guyana, Guyane, Haïti, Honduras, Jamaïque, Mexique, Nicaragua, Panama, Paraguay, Pérou, Porto Rico, République dominicaine, Saint-Christophe-et-Niévès, Sainte-Lucie, Saint-Vincent-et-les-Grenadines, Salvador, Suriname, Trinité-et-Tobago, Uruguay, Venezuela
Autres pays de l'OCDE	Australie, Canada, Japon, Nouvelle-Zélande, Norvège, Suisse, Turquie

Source : Correspondance privée avec Chris Hope

Tableau 18 – Coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) déterministe du DICE-2016R1
selon le taux d'escompte et le scénario socioéconomique

Taux d'escompte	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
1,0%	381.24	353.97	209.68	252.88	615.57
1,4%	243.92	223.61	128.82	162.66	390.70
2,0%	137.37	123.65	73.38	92.72	216.21
2,5%	91.17	80.96	49.41	62.33	140.92
3,0%	63.46	55.70	35.01	44.01	96.16
4,0%	34.19	29.51	19.67	24.47	49.72
5,0%	20.44	17.47	12.29	15.09	28.56

Tableau 19 – Coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) déterministe du FUND 3.9
selon le taux d'escompte et le scénario socioéconomique

Taux d'escompte	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
1,0%	468.73	421.54	276.51	369.16	613.36
1,4%	321.06	283.74	182.78	248.65	426.66
2,0%	190.11	164.01	103.29	144.15	257.01
2,5%	126.45	107.02	66.16	94.36	172.95
3,0%	85.62	71.04	42.97	62.84	118.43
4,0%	40.24	31.86	17.90	28.28	57.30
5,0%	18.56	13.61	6.27	12.00	27.87

Tableau 20 – Coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) déterministe du PAGE-ICE selon le taux d'escompte et le scénario socioéconomique

Taux d'escompte	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
1,0%	520.39	456.71	283.48	349.71	792.70
1,4%	348.12	303.51	191.46	235.68	522.68
2,0%	208.54	180.20	116.66	143.03	306.30
2,5%	144.63	124.20	82.18	100.38	208.66
3,0%	104.44	89.22	60.33	73.38	148.09
4,0%	59.39	50.36	35.48	42.78	81.54
5,0%	36.68	30.97	22.65	27.05	48.92

Tableau 21 – Coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) du DICE-2016R1 moyen selon le taux d'escompte et le scénario socioéconomique

Taux d'escompte	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
1,0%	387.60	360.47	204.11	257.06	626.08
1,4%	246.62	226.46	130.22	164.36	395.45
2,0%	137.92	124.33	73.61	92.99	217.43
2,5%	91.10	81.01	49.32	62.21	141.09
3,0%	63.17	55.52	34.81	43.76	95.92
4,0%	33.85	29.24	19.45	24.20	49.32
5,0%	20.16	17.25	12.12	14.87	28.21

Tableau 22 – Coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) au 50^e centile du DICE-2016R1
selon le taux d'escompte et le scénario socioéconomique

Taux d'escompte	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
1,0%	367.50	341.06	193.55	243.89	592.87
1,4%	235.54	215.82	124.49	157.17	376.87
2,0%	132.98	119.64	71.12	89.83	209.02
2,5%	88.42	78.48	47.99	60.51	136.48
3,0%	61.65	54.09	34.06	42.81	93.28
4,0%	33.32	28.75	19.20	23.87	48.38
5,0%	19.96	17.07	12.03	14.76	27.85

Tableau 23 – Coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) au 95^e centile du DICE-2016R1
selon le taux d'escompte et le scénario socioéconomique

Taux d'escompte	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
1,0%	664.88	622.31	348.54	438.78	1082.58
1,4%	413.01	381.85	216.35	273.23	669.76
2,0%	223.11	202.55	117.59	148.86	357.17
2,5%	143.52	128.48	76.46	96.78	226.23
3,0%	97.15	85.89	52.52	66.36	150.36
4,0%	49.91	43.28	28.02	35.11	74.22
5,0%	28.69	24.59	16.82	20.82	40.97

Tableau 24 – Écart-type des distributions du coût social du carbone en 2020 du DICE-2016R1 (\$ CA 2018)

Taux d'escompte	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
1,0%	149.37	140.77	77.83	97.97	245.45
1,4%	90.38	84.21	46.83	59.22	148.62
2,0%	46.87	42.91	24.24	30.81	76.58
2,5%	29.14	26.31	15.14	19.28	47.10
3,0%	19.07	17.00	9.99	12.73	30.39
4,0%	9.18	8.00	4.94	6.27	14.13
5,0%	4.96	4.25	2.76	3.48	7.35

Tableau 25 – Coefficient de variation des distributions du coût social du carbone en 2020 du DICE-2016R1

Taux d'escompte	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
1,0%	2.59	2.56	2.62	2.62	2.55
1,4%	2.73	2.69	2.78	2.78	2.66
2,0%	2.94	2.90	3.04	3.02	2.84
2,5%	3.13	3.08	3.26	3.23	3.00
3,0%	3.31	3.27	3.48	3.44	3.16
4,0%	3.69	3.65	3.94	3.86	3.49
5,0%	4.07	4.06	4.40	4.28	3.84

Tableau 26 – Coefficient d’asymétrie des distributions du coût social du carbone en 2020 du DICE-2016R1

Taux d’escompte	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
1,0%	0.78	0.80	0.80	0.78	0.76
1,4%	0.70	0.73	0.71	0.70	0.71
2,0%	0.60	0.63	0.59	0.59	0.62
2,5%	0.52	0.55	0.51	0.50	0.55
3,0%	0.45	0.48	0.43	0.43	0.49
4,0%	0.34	0.36	0.30	0.30	0.38
5,0%	0.24	0.25	0.19	0.20	0.28

Tableau 27 – Coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) du FUND 3.9 moyen selon le taux d’escompte et le scénario socioéconomique

Taux d’escompte	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
1,0%	615.33	555.26	395.84	508.45	732.84
1,4%	465.24	411.29	283.95	374.59	574.32
2,0%	307.30	264.98	177.60	240.90	392.19
2,5%	219.59	186.01	122.77	169.41	285.25
3,0%	158.45	132.05	86.17	120.67	208.52
4,0%	84.66	68.33	43.64	63.00	113.63
5,0%	46.20	35.97	22.19	33.47	63.28

Tableau 28 – Coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) au 50^e centile du FUND 3.9
selon le taux d'escompte et le scénario socioéconomique

Taux d'escompte	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
1,0%	598.56	541.39	378.01	493.84	722.22
1,4%	438.88	389.85	265.27	353.63	551.59
2,0%	278.38	241.94	160.24	218.30	361.46
2,5%	192.97	164.84	107.99	148.88	255.09
3,0%	135.32	113.80	74.02	103.02	181.28
4,0%	68.78	56.09	35.64	51.13	93.74
5,0%	35.51	27.95	16.97	25.73	49.73

Tableau 29 – Coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) au 95^e centile du FUND 3.9
selon le taux d'escompte et le scénario socioéconomique

Taux d'escompte	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
1,0%	1158.82	1046.63	796.62	989.53	1336.22
1,4%	934.01	825.37	603.66	774.01	1105.45
2,0%	672.37	578.31	409.35	541.43	820.25
2,5%	510.44	432.30	302.96	406.43	634.65
3,0%	392.03	327.11	228.34	309.80	489.98
4,0%	237.35	194.11	135.73	185.07	299.42
5,0%	149.25	120.27	85.65	116.26	188.95

Tableau 30 – Écart-type des distributions du coût social du carbone en 2020 du FUND 3.9
(\$ CA 2018)

Taux d'escompte	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
1,0%	312.82	284.49	225.29	277.13	357.36
1,4%	258.39	229.27	175.10	221.43	299.48
2,0%	194.36	168.12	125.01	161.71	229.90
2,5%	153.78	131.10	96.85	126.27	183.81
3,0%	122.53	103.36	76.51	99.89	147.28
4,0%	80.13	66.73	50.26	65.10	96.51
5,0%	54.76	45.36	35.04	44.69	65.61

Tableau 31 – Coefficient de variation des distributions du coût social du carbone en 2020
du FUND 3.9

Taux d'escompte	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
1,0%	1.97	1.95	1.76	1.83	2.05
1,4%	1.80	1.79	1.62	1.69	1.92
2,0%	1.58	1.58	1.42	1.49	1.71
2,5%	1.43	1.42	1.27	1.34	1.55
3,0%	1.29	1.28	1.13	1.21	1.42
4,0%	1.06	1.02	0.87	0.97	1.18
5,0%	0.84	0.79	0.63	0.75	0.96

Tableau 32 – Coefficient d’asymétrie des distributions du coût social du carbone en 2020 du FUND 3.9

Taux d’escompte	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
1,0%	0.08	0.16	0.42	0.15	0.01
1,4%	0.38	0.44	0.65	0.45	0.31
2,0%	0.71	0.76	0.91	0.78	0.64
2,5%	0.92	0.96	1.05	0.97	0.86
3,0%	1.09	1.11	1.16	1.12	1.05
4,0%	1.33	1.31	1.27	1.30	1.32
5,0%	1.45	1.39	1.28	1.37	1.49

Tableau 33 – Coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) du PAGE-ICE moyen selon le taux d’escompte et le scénario socioéconomique

Taux d’escompte	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
1,0%	640.14	577.85	378.34	452.04	960.10
1,4%	432.25	387.57	257.77	307.62	638.64
2,0%	262.12	232.85	158.65	188.92	378.39
2,5%	183.41	161.83	112.48	133.65	259.89
3,0%	133.50	117.12	82.98	98.35	185.85
4,0%	76.95	66.93	49.16	57.92	103.72
5,0%	48.05	41.57	31.52	36.90	62.95

Tableau 34 – Coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) au 50^e centile du PAGE-ICE selon le taux d'escompte et le scénario socioéconomique

Taux d'escompte	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
1,0%	497.75	452.23	298.88	350.50	742.60
1,4%	332.29	299.55	200.76	235.47	488.25
2,0%	198.71	177.34	121.47	142.43	285.55
2,5%	137.87	122.08	85.21	99.82	194.46
3,0%	99.68	87.74	62.35	72.87	138.19
4,0%	56.99	49.65	36.50	42.53	76.53
5,0%	35.35	30.59	23.20	26.88	46.18

Tableau 35 – Coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) au 95^e centile du PAGE-ICE selon le taux d'escompte et le scénario socioéconomique

Taux d'escompte	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
1,0%	1614.85	1435.56	931.51	1149.25	2432.39
1,4%	1117.25	987.56	660.84	810.55	1640.67
2,0%	705.92	621.78	426.96	519.85	1008.77
2,5%	504.10	442.04	306.76	373.68	709.50
3,0%	373.34	325.46	229.29	278.75	519.33
4,0%	215.19	187.76	134.63	162.26	295.47
5,0%	130.93	113.43	84.24	100.52	175.65

Tableau 36 – Écart-type des distributions du coût social du carbone en 2020 du PAGE-ICE
(\$ CA 2018)

Taux d'escompte	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
1,0%	479.40	429.41	275.42	341.32	730.17
1,4%	336.19	299.36	195.88	241.97	503.48
2,0%	213.73	188.74	127.29	156.42	311.70
2,5%	154.22	135.36	93.60	114.47	220.09
3,0%	115.11	100.51	71.24	86.66	160.84
4,0%	69.23	60.00	44.57	53.57	92.92
5,0%	44.98	38.86	30.06	35.69	58.26

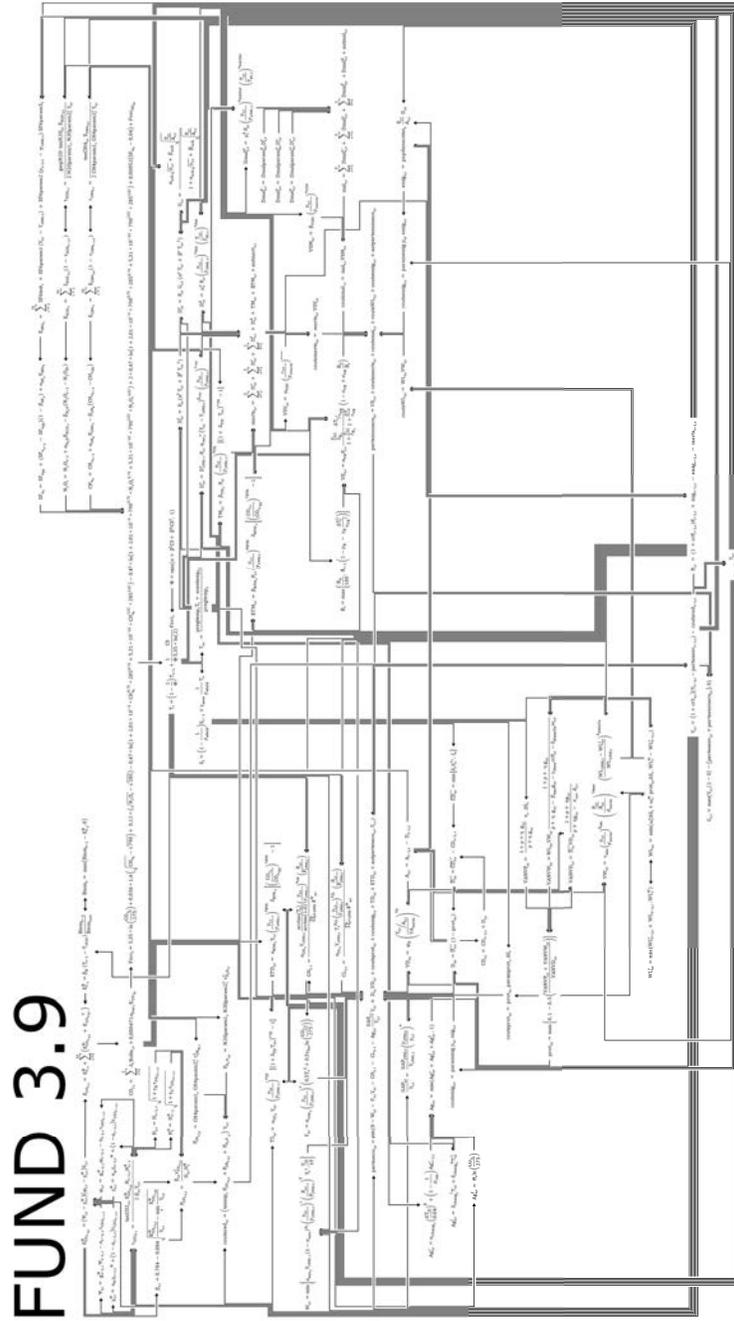
Tableau 37 – Coefficient de variation des distributions du coût social du carbone en 2020
du PAGE-ICE

Taux.d.escompte	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
1,0%	1.34	1.35	1.37	1.32	1.31
1,4%	1.29	1.29	1.32	1.27	1.27
2,0%	1.23	1.23	1.25	1.21	1.21
2,5%	1.19	1.20	1.20	1.17	1.18
3,0%	1.16	1.17	1.16	1.13	1.16
4,0%	1.11	1.12	1.10	1.08	1.12
5,0%	1.07	1.07	1.05	1.03	1.08

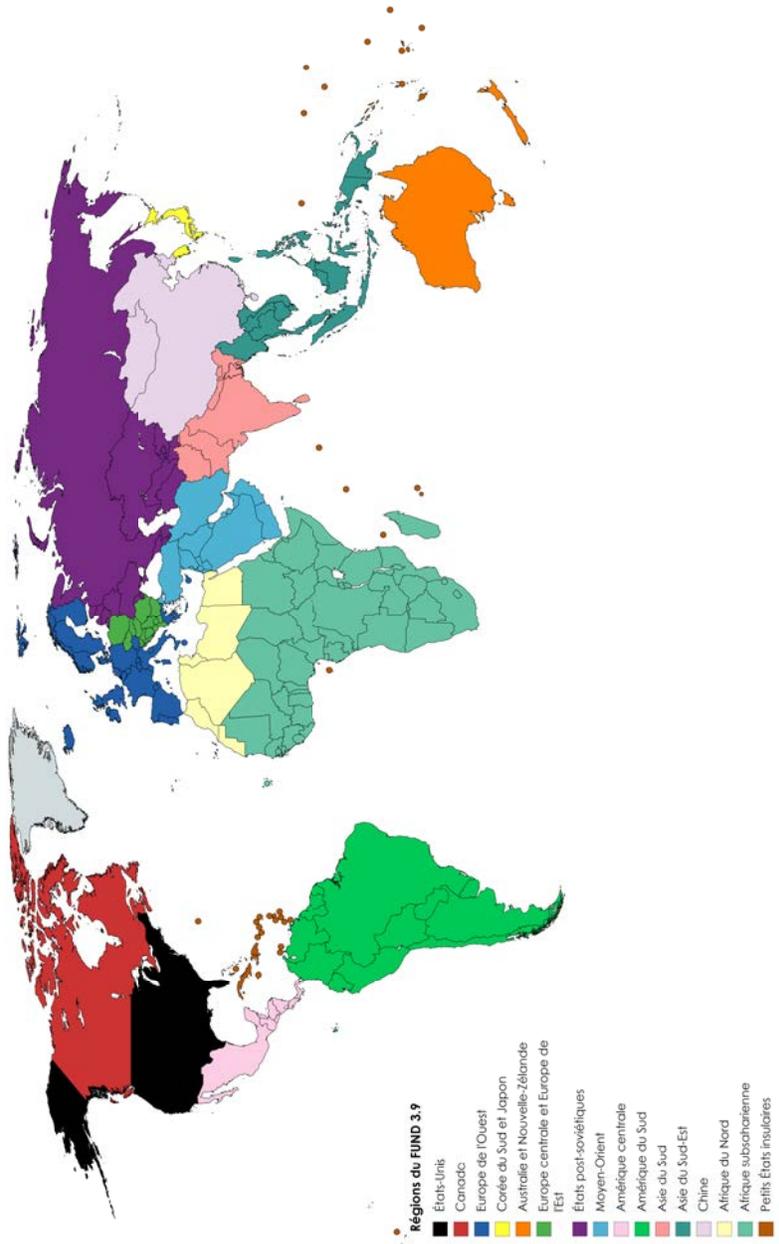
Tableau 38 – Coefficient d’asymétrie des distributions du coût social du carbone en 2020 du
PAGE-ICE

Taux d’escompte	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
1,0%	2.38	2.43	2.41	2.36	2.40
1,4%	2.52	2.57	2.53	2.50	2.55
2,0%	2.69	2.72	2.67	2.66	2.72
2,5%	2.78	2.80	2.76	2.76	2.81
3,0%	2.85	2.85	2.86	2.85	2.86
4,0%	3.01	3.00	3.15	3.10	2.94
5,0%	3.28	3.29	3.57	3.46	3.11

Graphique 8 – Schéma simplifié du modèle FUND 3.9

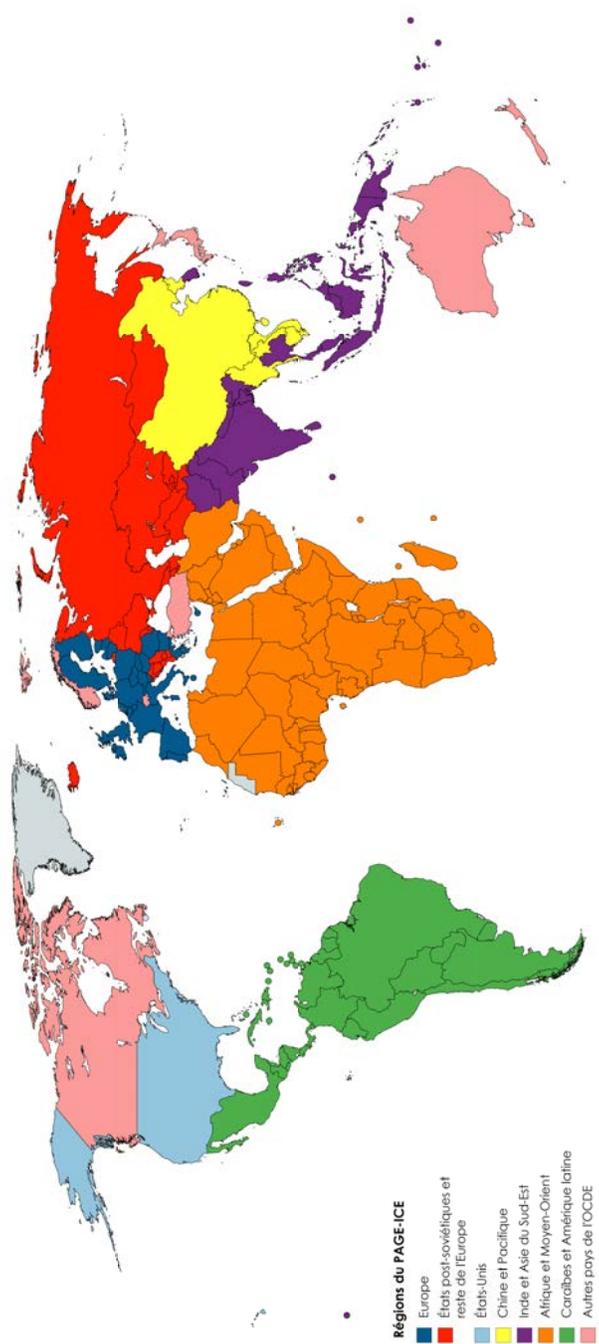


Graphique 9 – Régions du FUND 3.9

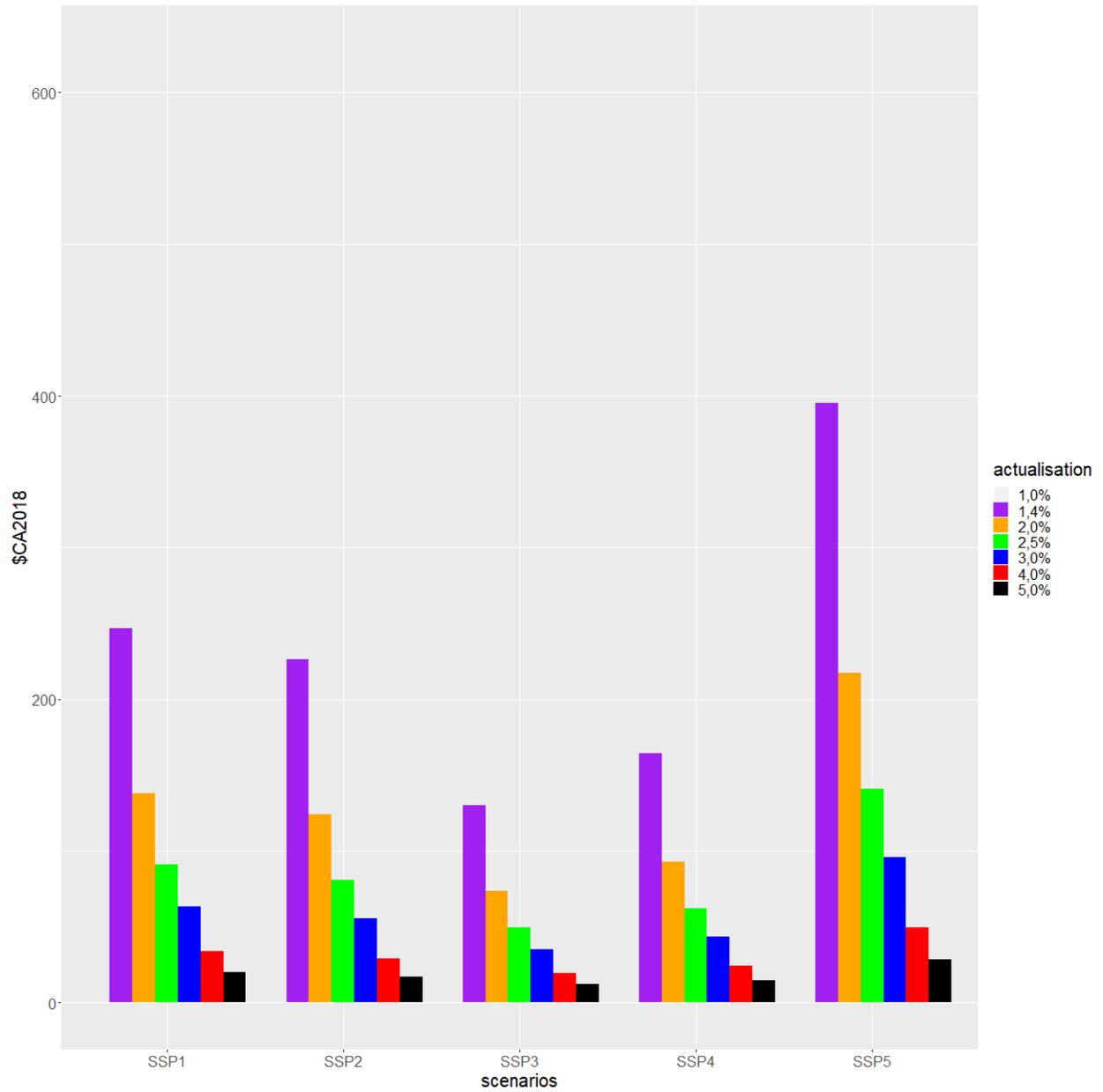


Created with mapchart.net ©

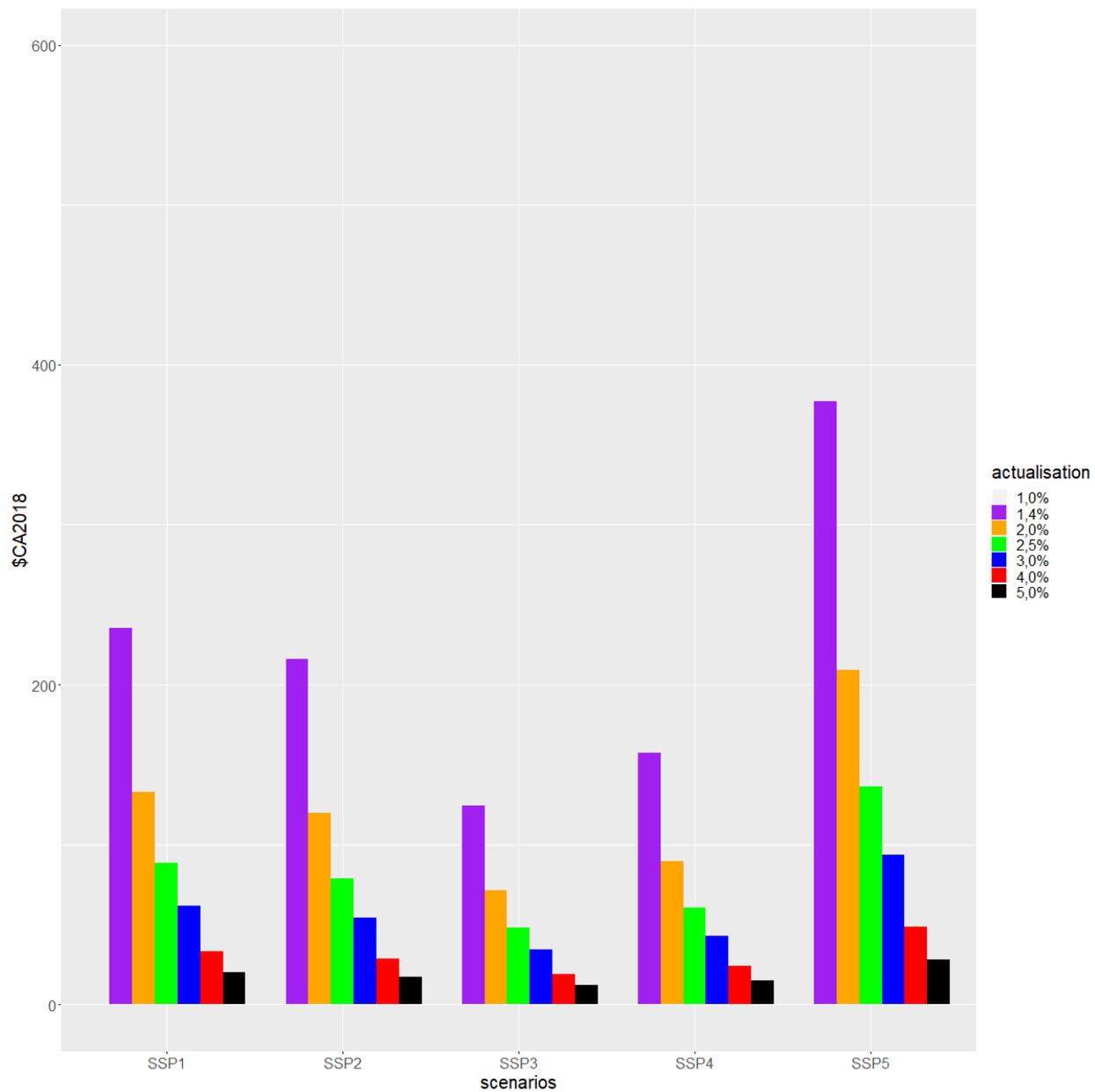
Graphique 10 – Régions du PAGE-ICE



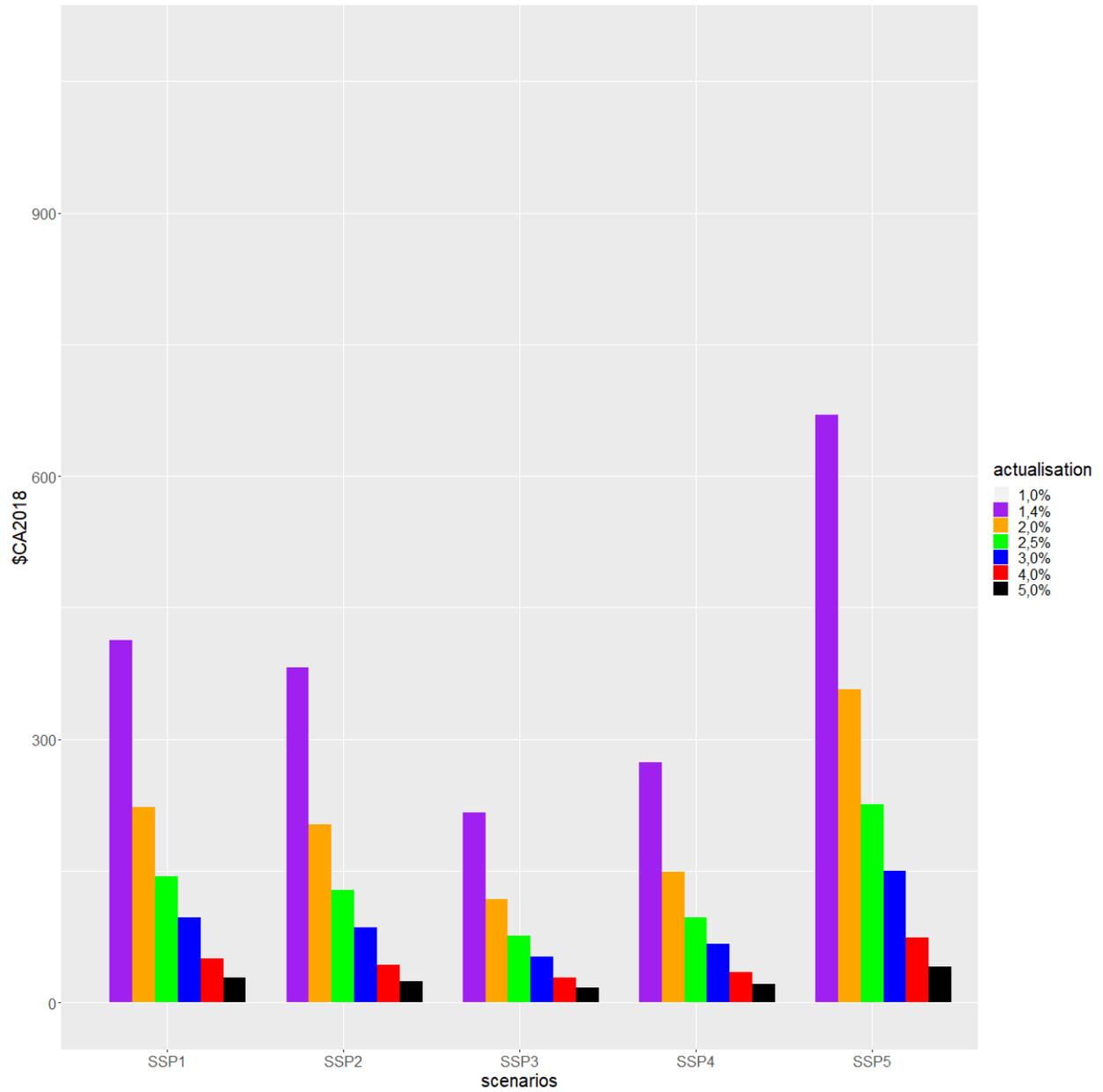
Graphique 11 – Coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) moyen du DICE-2016R1 selon le taux d'escompte et le scénario socioéconomique



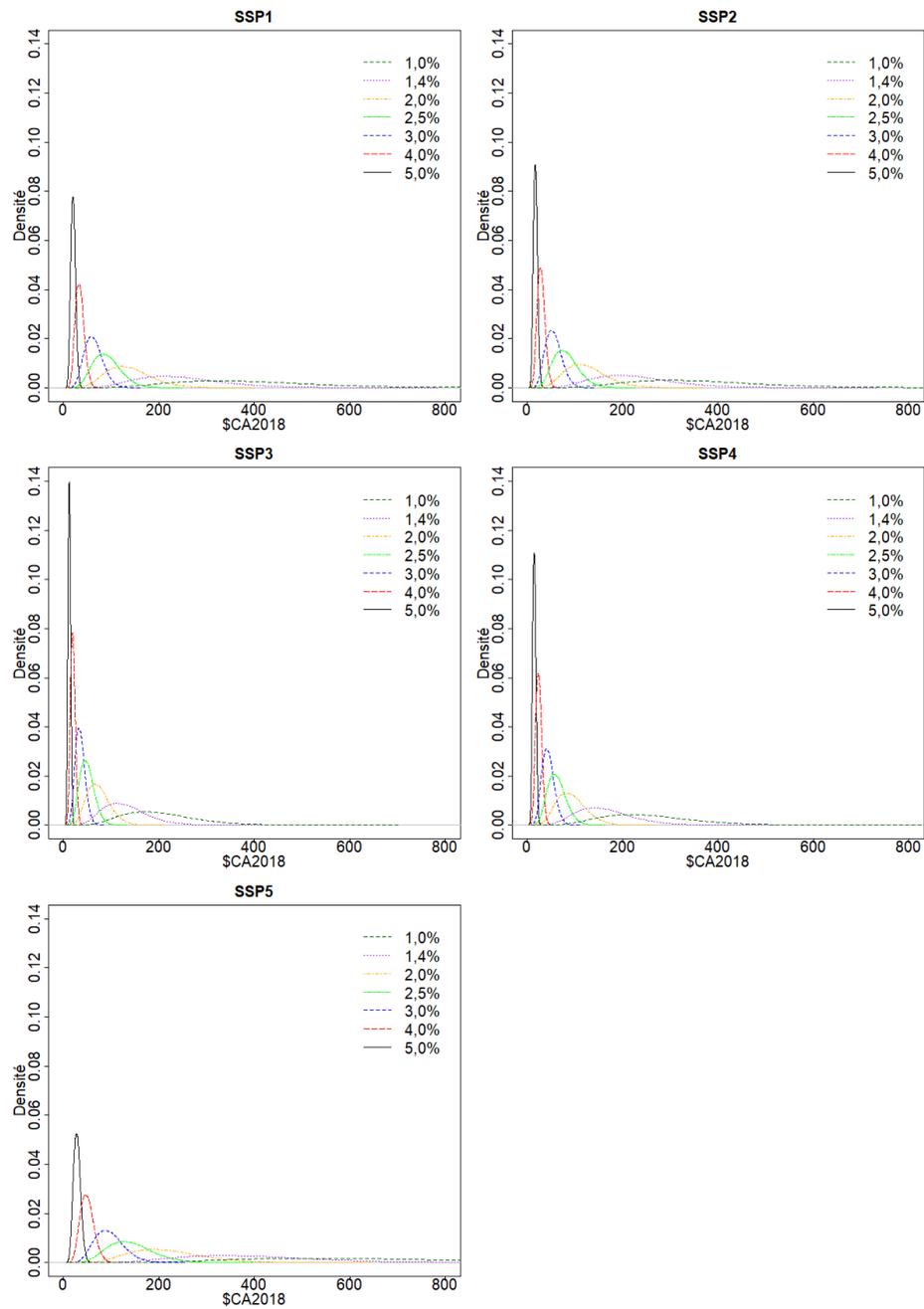
Graphique 12 – Coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) au 50^e centile du DICE-2016R1 selon le taux d'escompte et le scénario socioéconomique



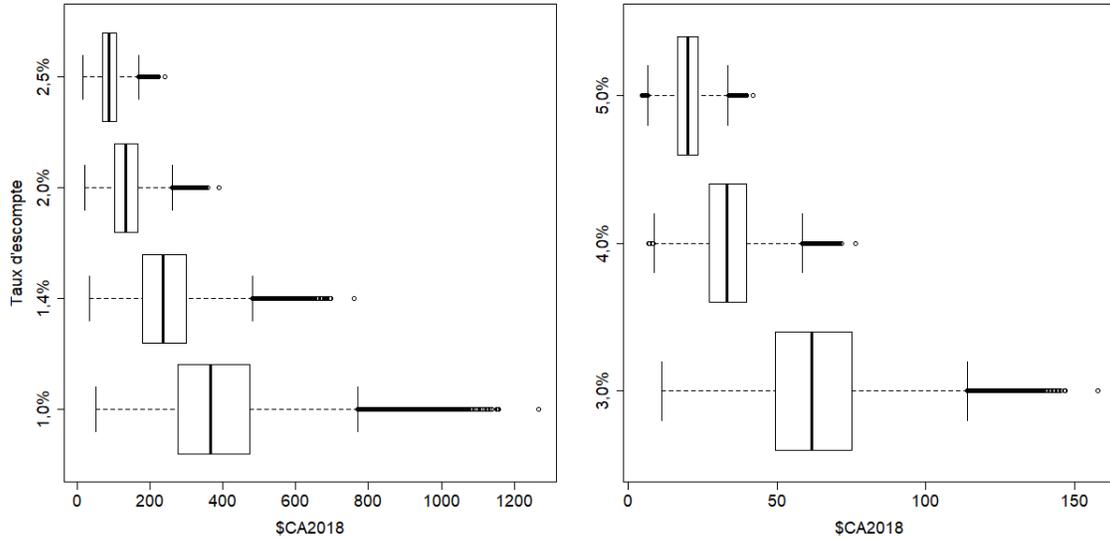
Graphique 13 – Coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) au 95^e centile du DICE-2016R1 selon le taux d'escompte et le scénario socioéconomique



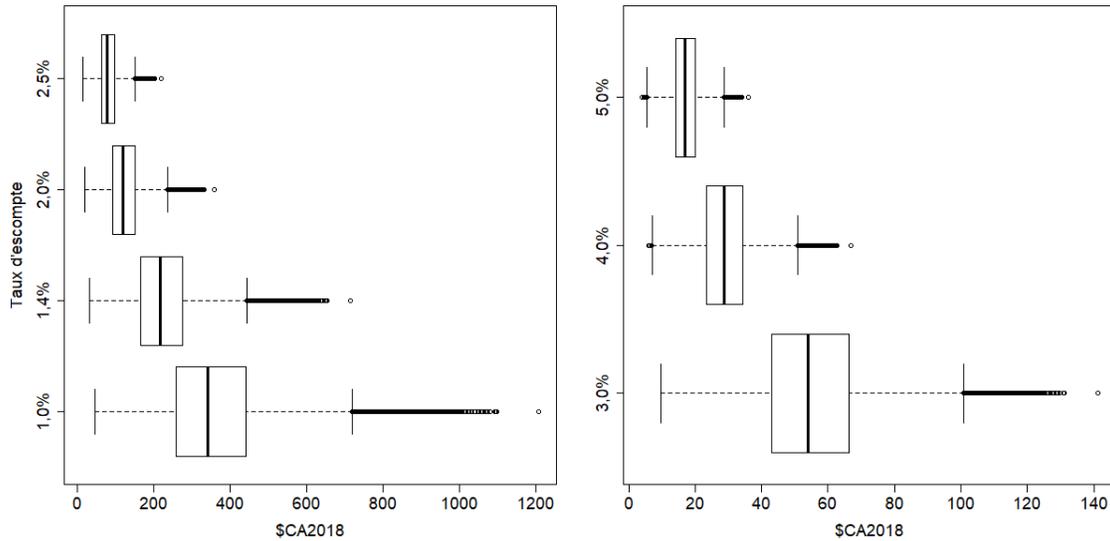
Graphique 14 – Distribution du coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) du DICE-2016R1 selon le taux d'escompte et le scénario socioéconomique



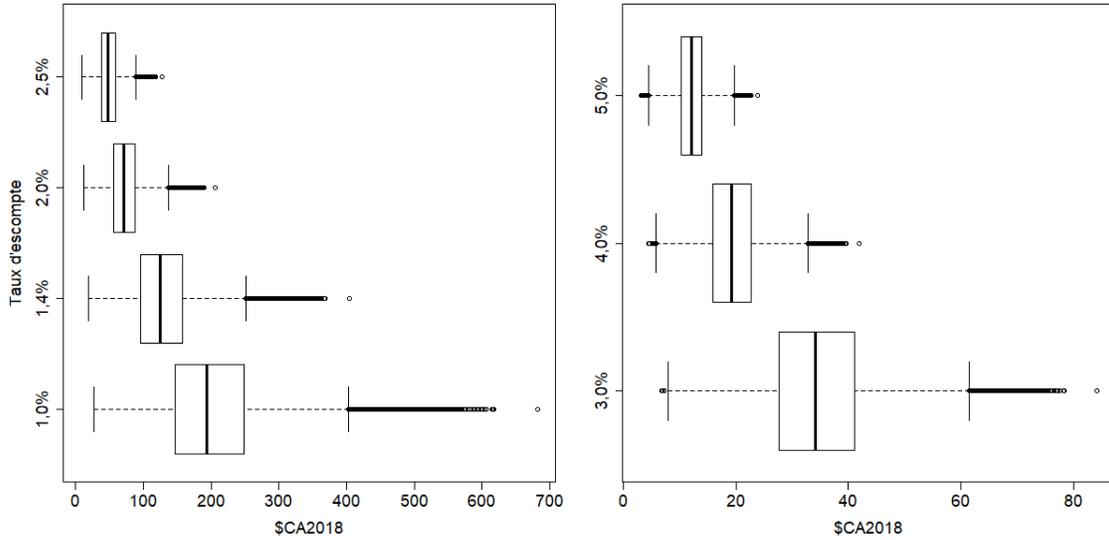
Graphique 15 – Diagrammes en boîte des distributions du coût social du carbone en 2020 du DICE-2016R1 (\$ CA 2018) dans le SSP1



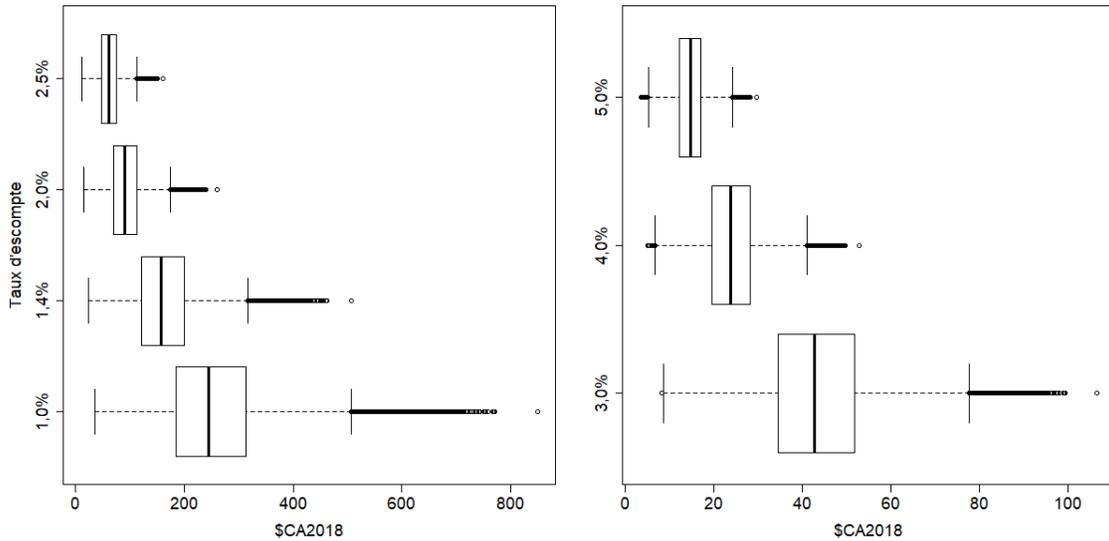
Graphique 16 – Diagrammes en boîte des distributions du coût social du carbone en 2020 du DICE-2016R1 (\$ CA 2018) dans le SSP2



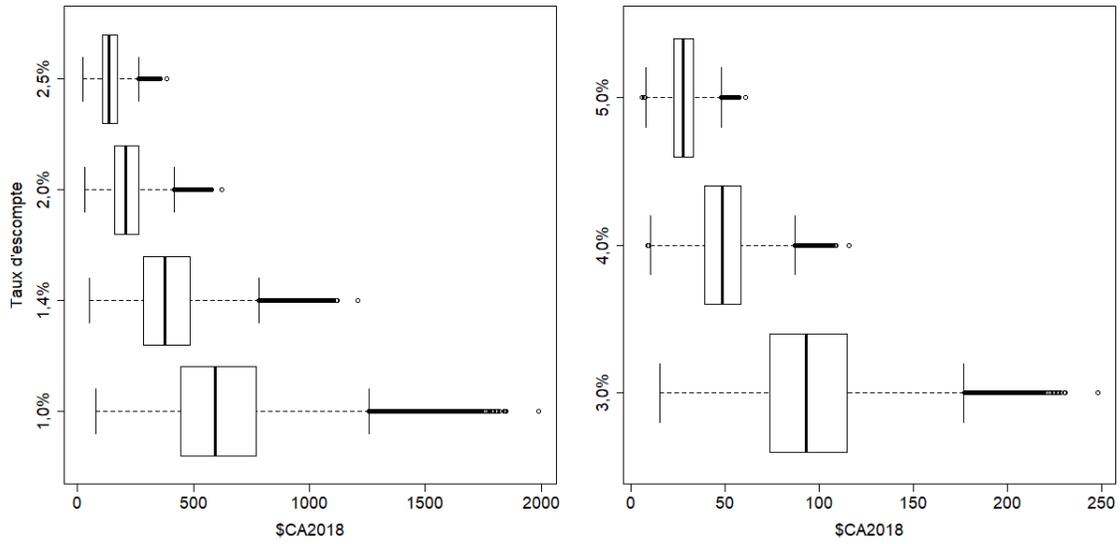
Graphique 17 – Diagrammes en boîte des distributions du coût social du carbone en 2020 du DICE-2016R1 (\$ CA 2018) dans le SSP3



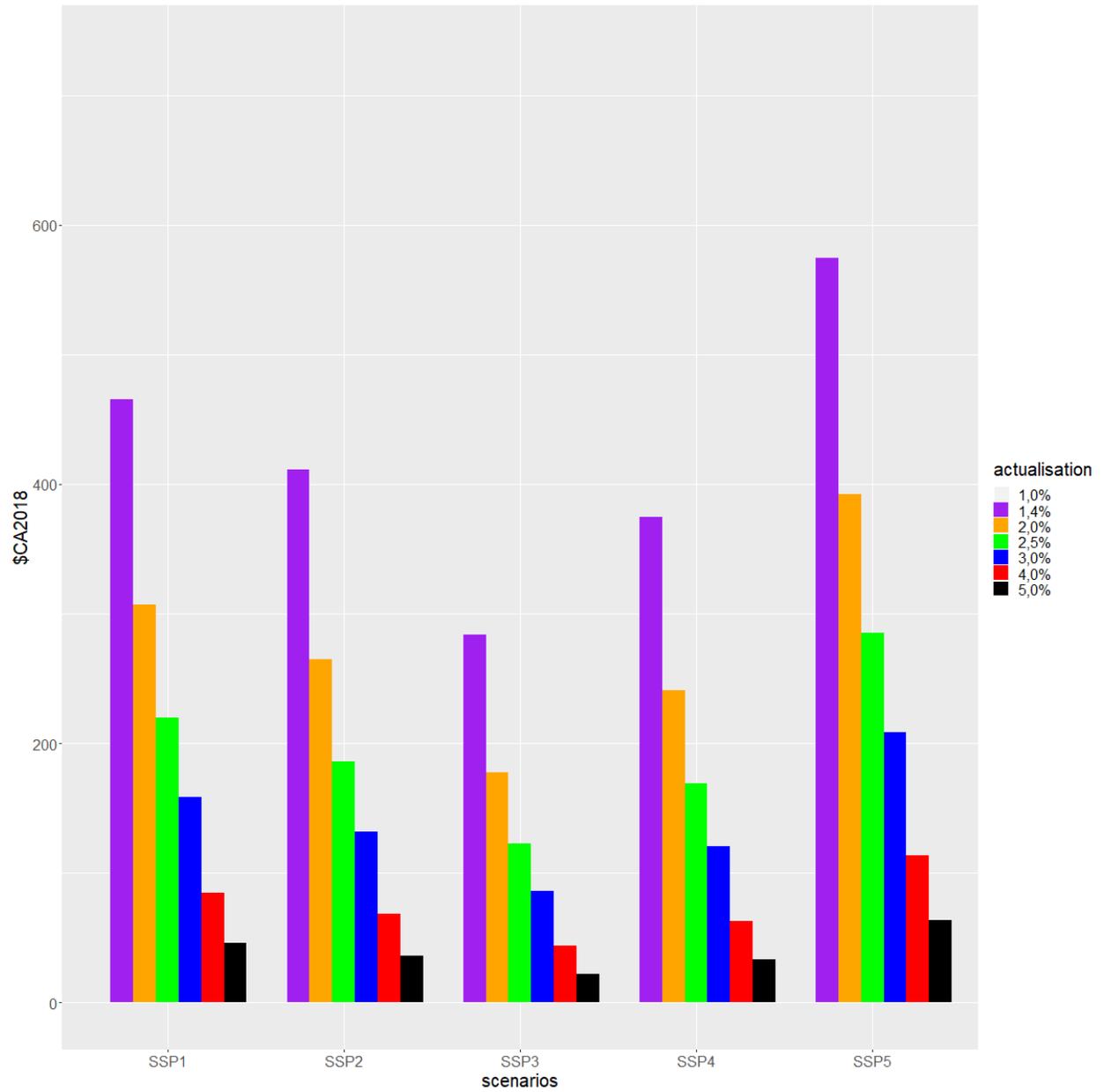
Graphique 18 – Diagrammes en boîte des distributions du coût social du carbone en 2020 du DICE-2016R1 (\$ CA 2018) dans le SSP4



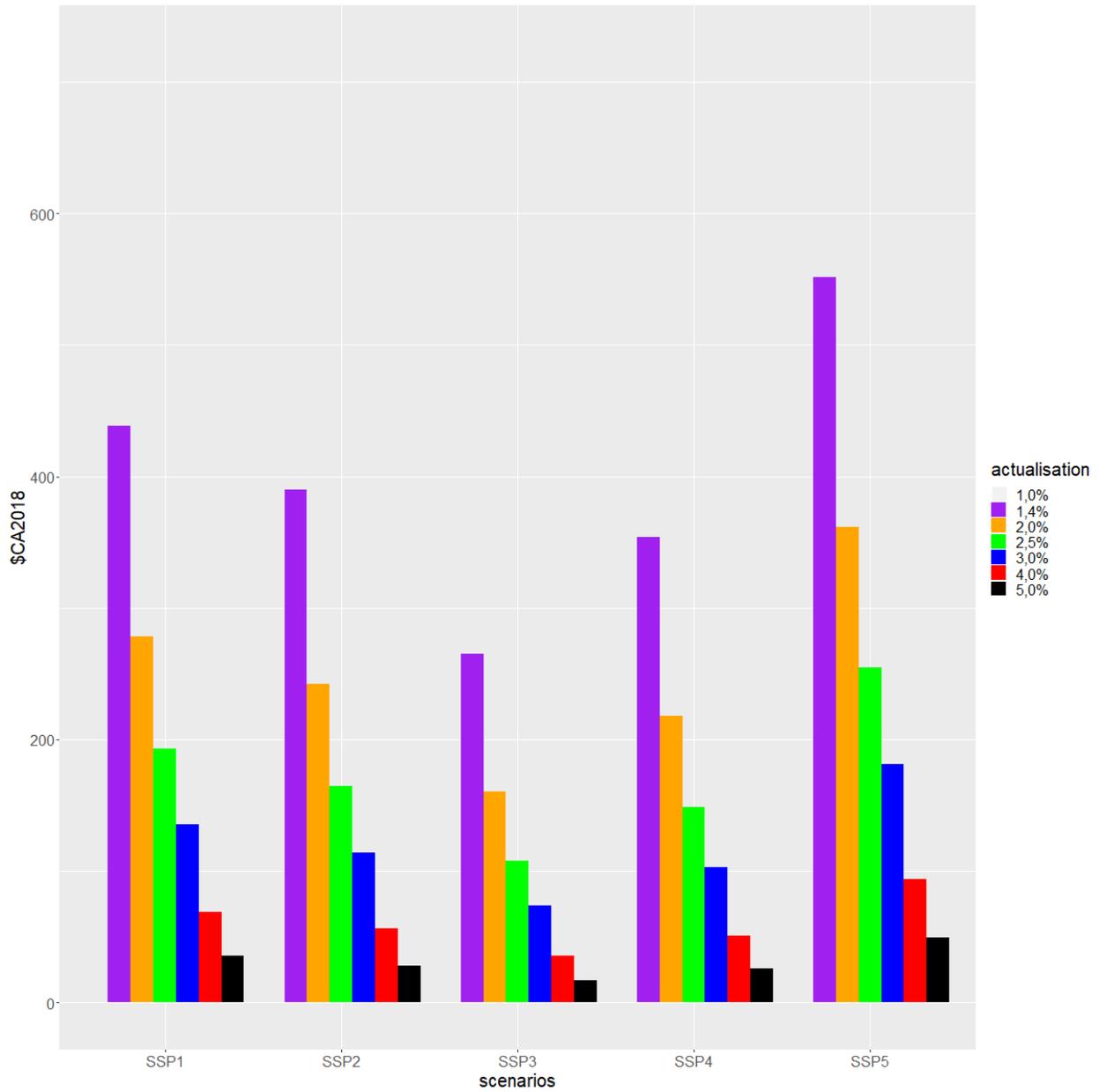
Graphique 19 – Diagrammes en boîte des distributions du coût social du carbone en 2020 du DICE-2016R1 (\$ CA 2018) dans le SSP5



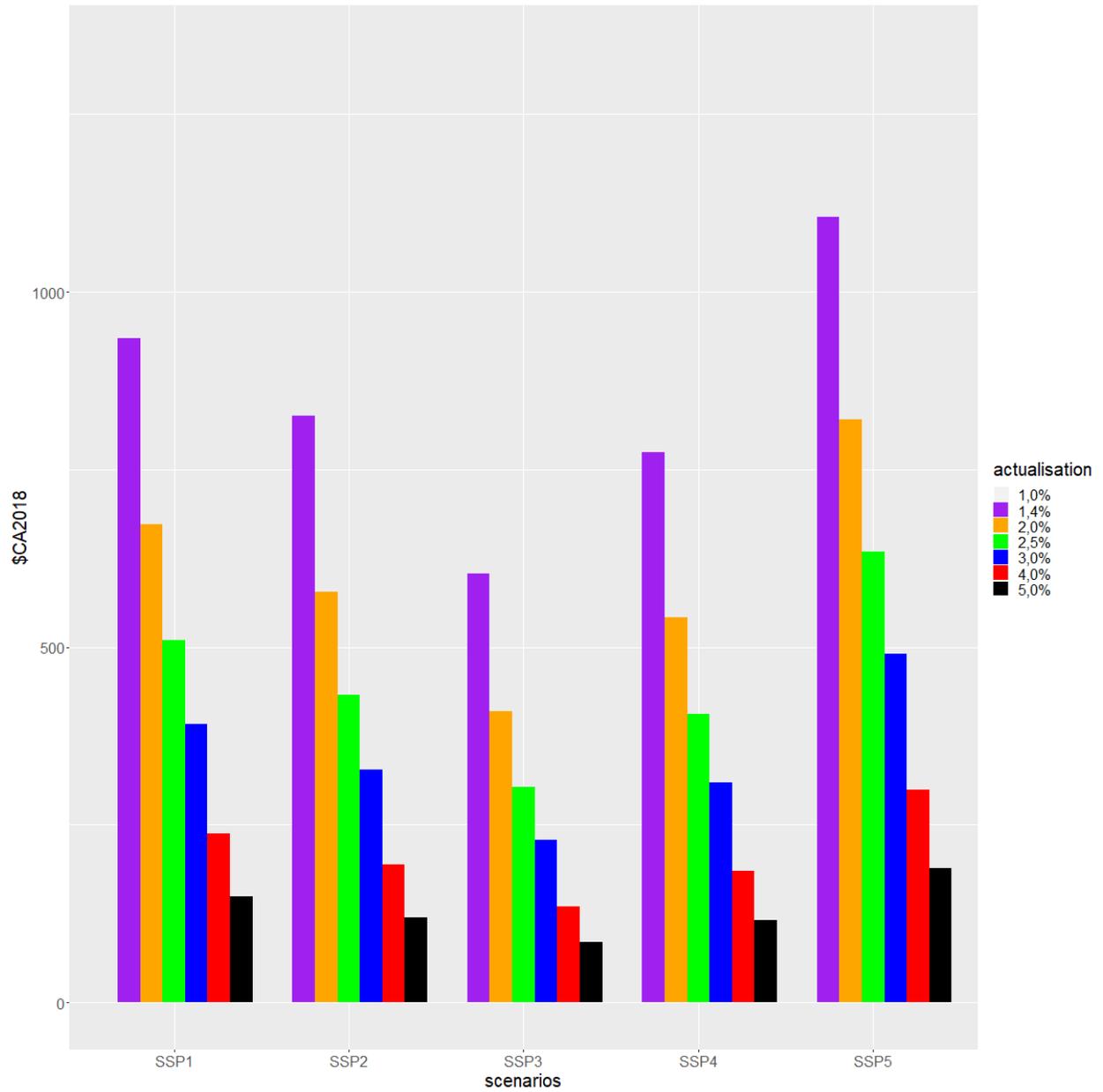
Graphique 20 – Coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) moyen du FUND 3.9 selon le taux d'escompte et le scénario socioéconomique



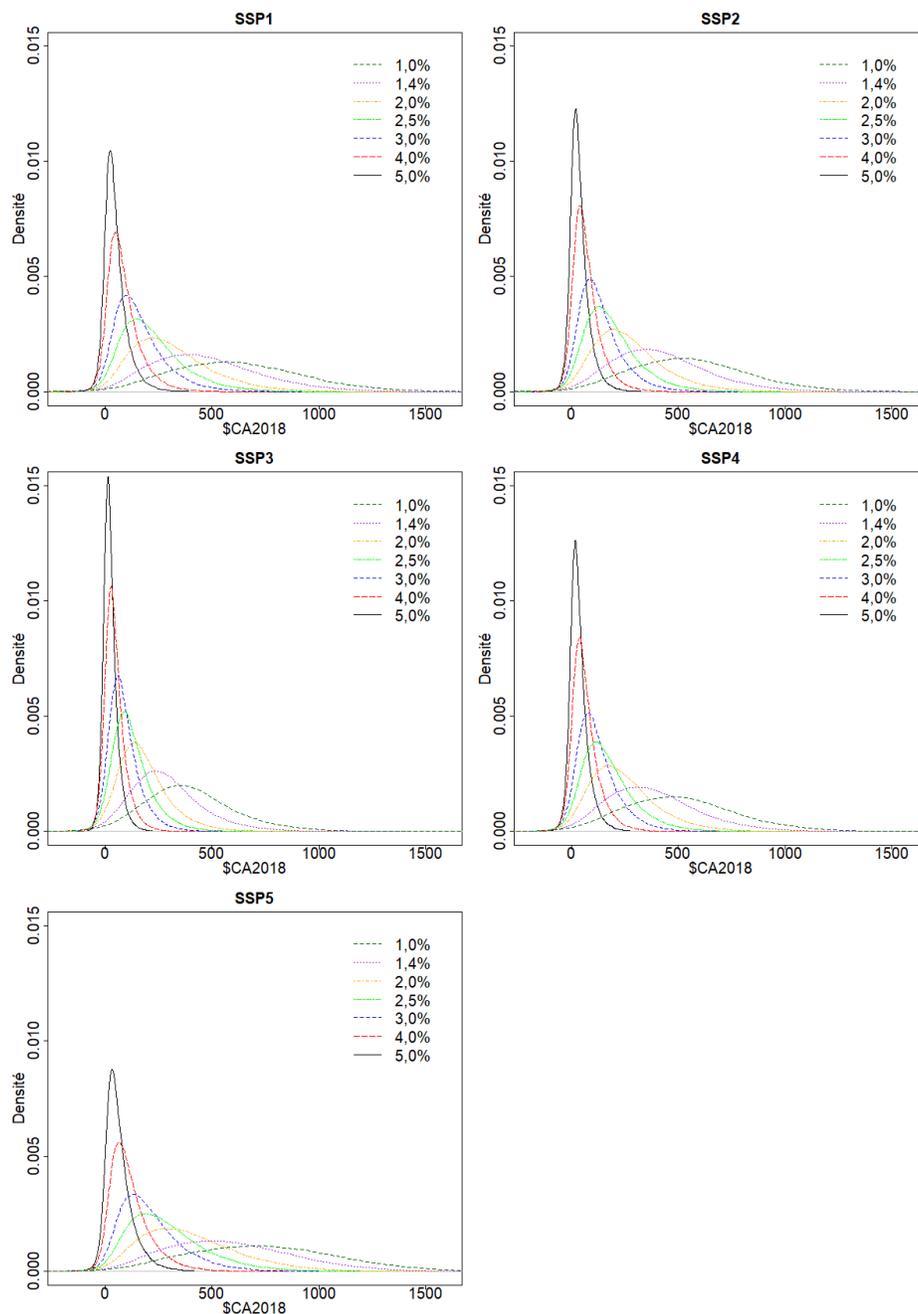
Graphique 21 – Coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) au 50^e centile du FUND 3.9 selon le taux d'escompte et le scénario socioéconomique



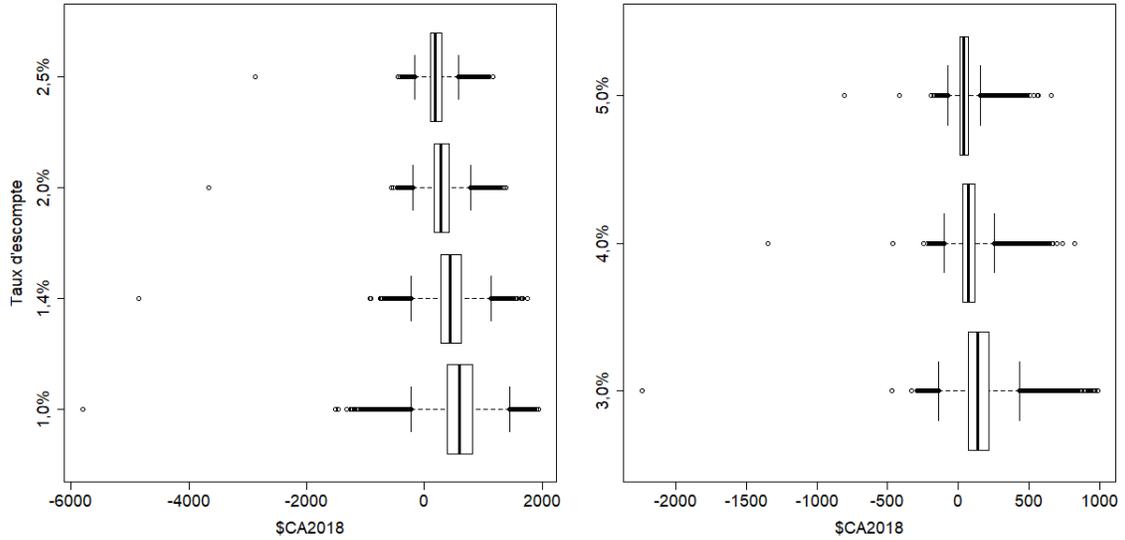
Graphique 22 – Coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) au 95^e centile du FUND 3.9 selon le taux d'escompte et le scénario socioéconomique



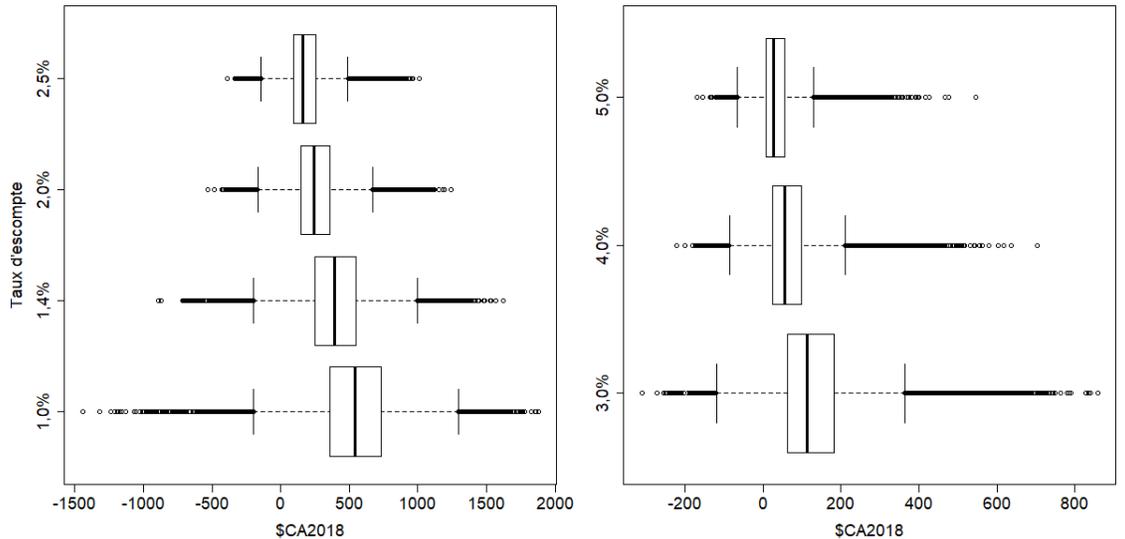
Graphique 23 – Distribution du coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) du FUND 3.9 selon le taux d'escompte et le scénario socioéconomique



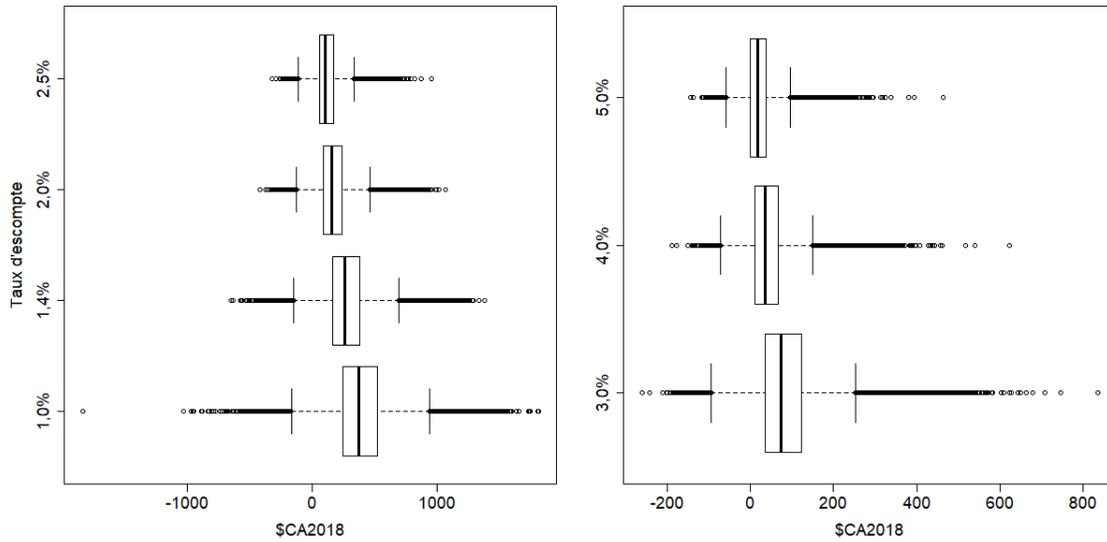
Graphique 24 – Diagrammes en boîte des distributions du coût social du carbone en 2020 du FUND 3.9 (\$ CA 2018) dans le SSP1



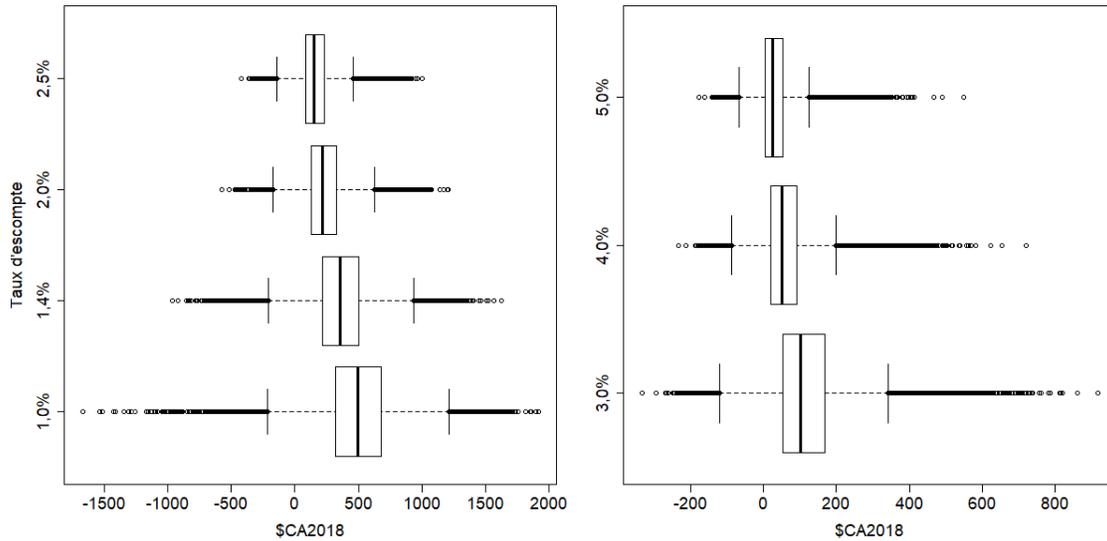
Graphique 25 – Diagrammes en boîte des distributions du coût social du carbone en 2020 du FUND 3.9 (\$ CA 2018) dans le SSP2



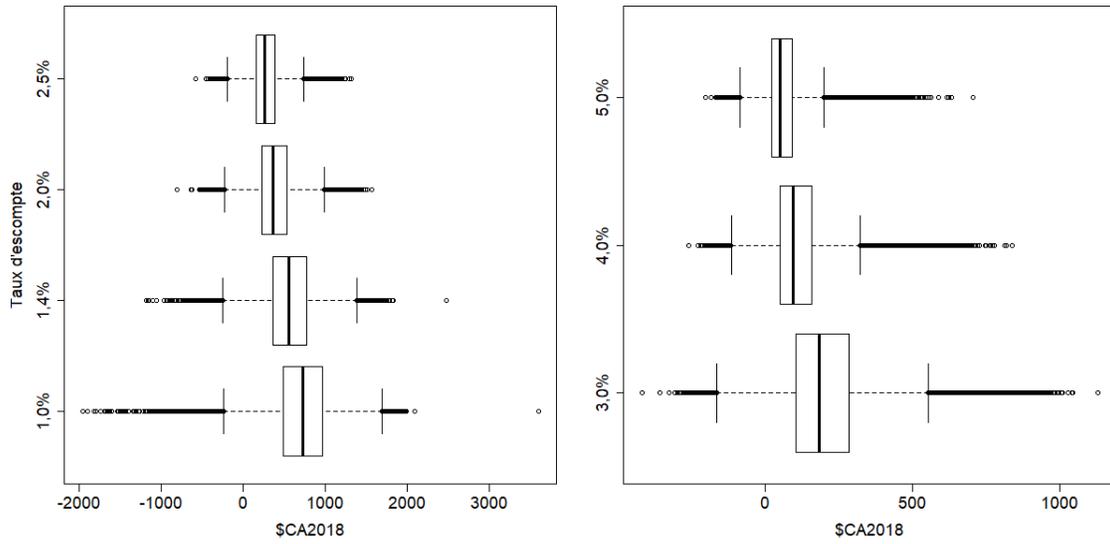
Graphique 26 – Diagrammes en boîte des distributions du coût social du carbone en 2020 du FUND 3.9 (\$ CA 2018) dans le SSP3



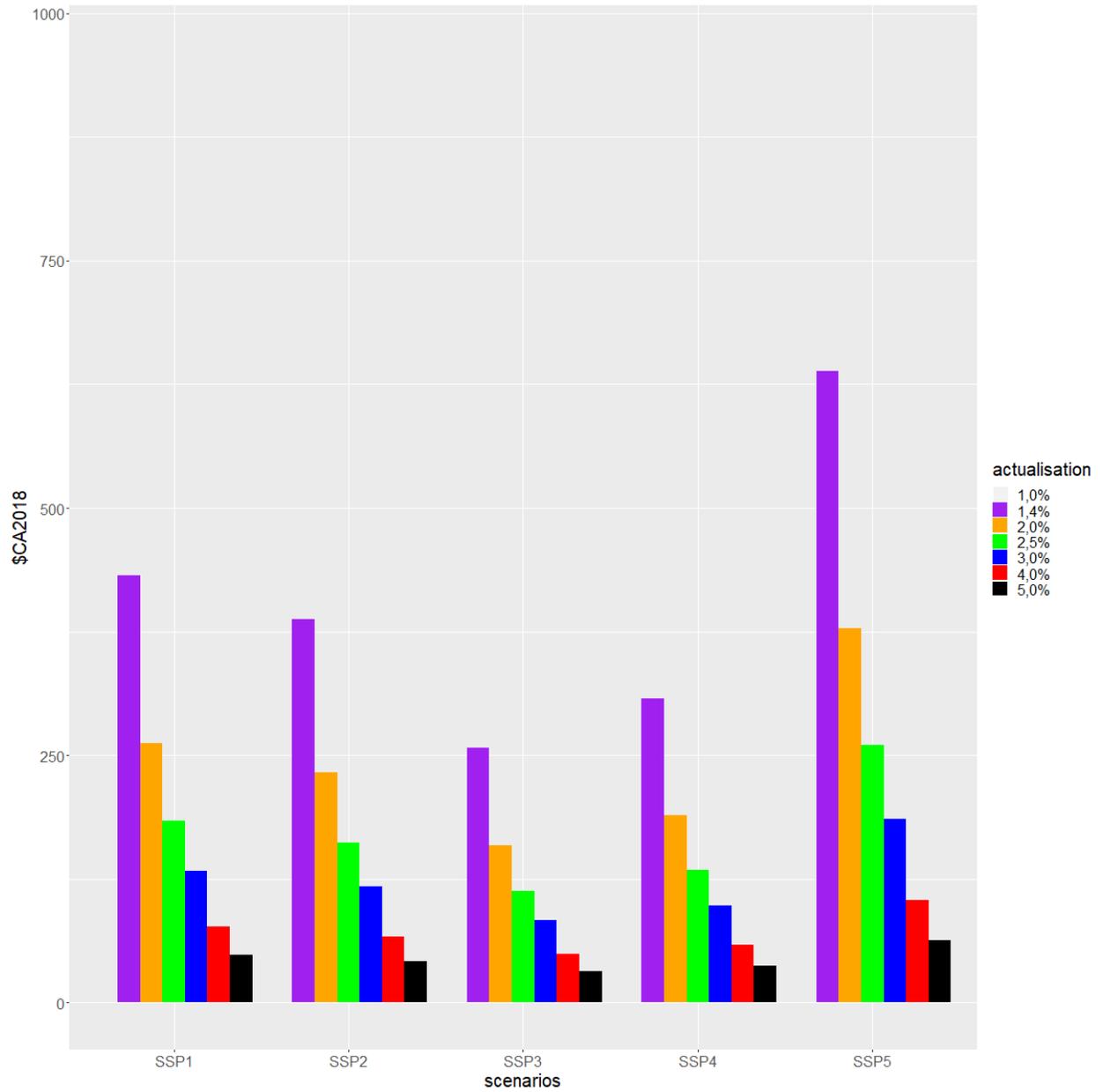
Graphique 27 – Diagrammes en boîte des distributions du coût social du carbone en 2020 du FUND 3.9 (\$ CA 2018) dans le SSP4



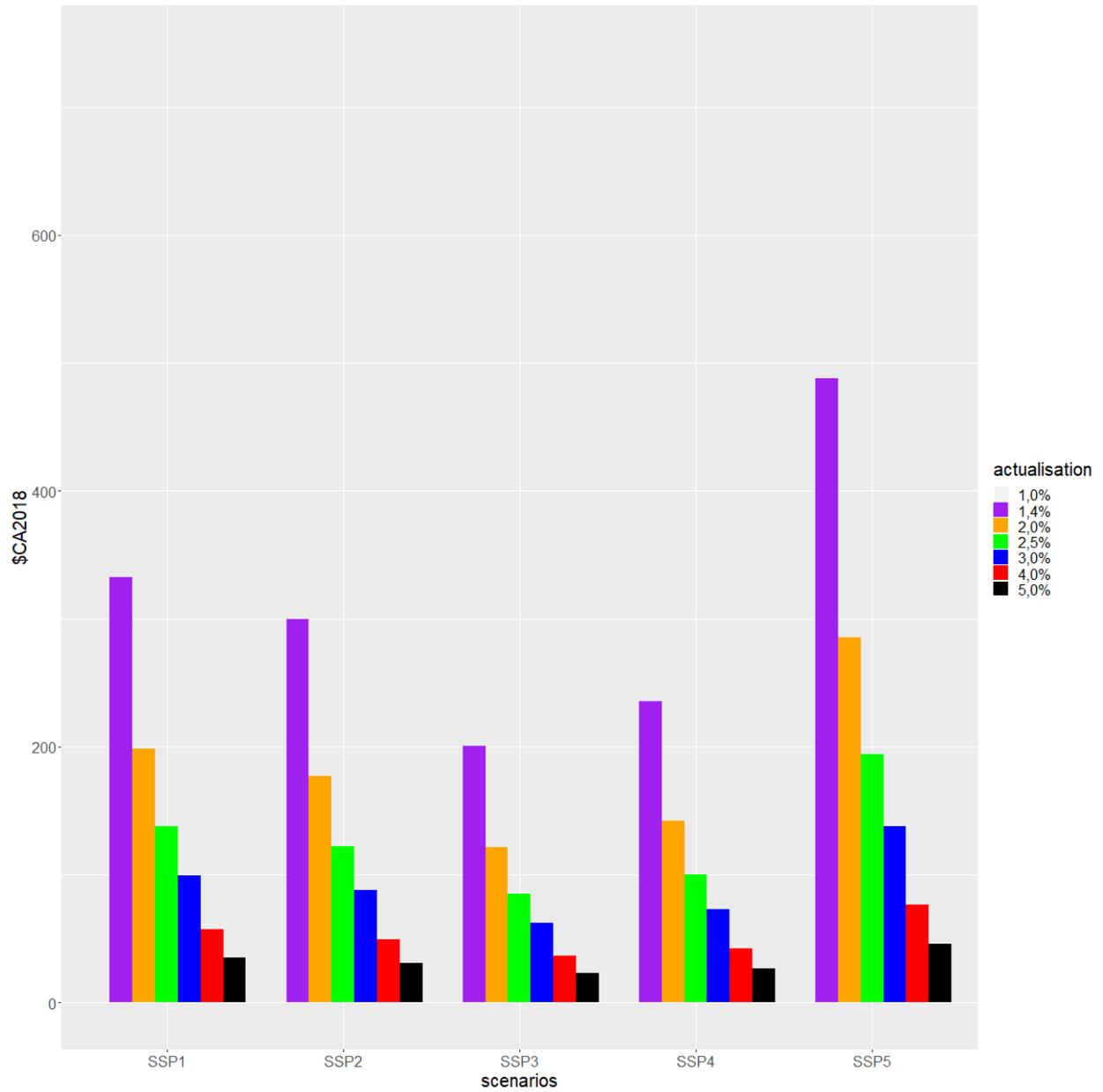
Graphique 28 – Diagrammes en boîte des distributions du coût social du carbone en 2020 du FUND 3.9 (\$ CA 2018) dans le SSP5



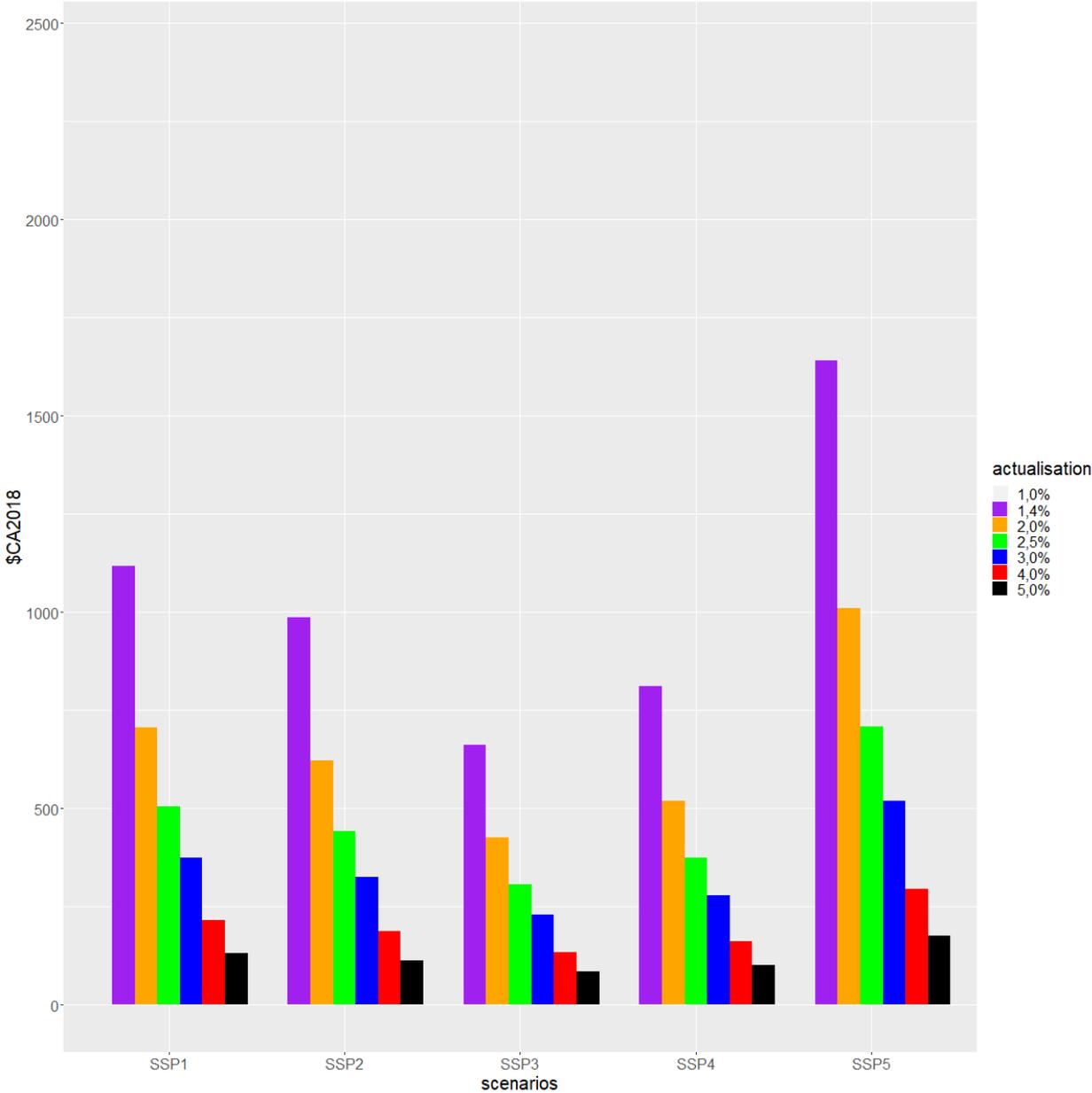
Graphique 29 – Coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) moyen du PAGE-ICE selon le taux d'escompte et le scénario socioéconomique



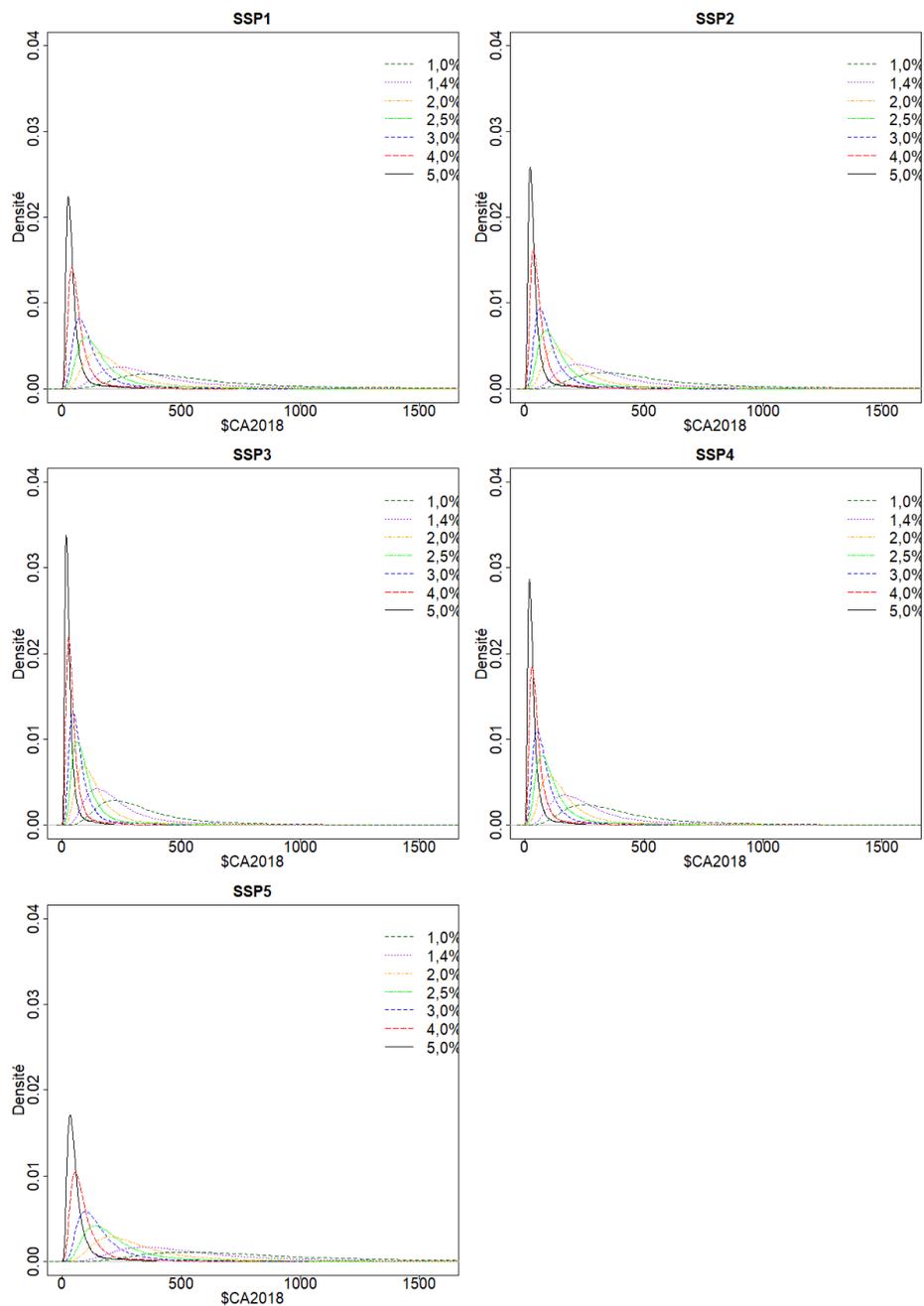
Graphique 30 – Coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) au 50^e centile du PAGE-ICE selon le taux d'escompte et le scénario socioéconomique



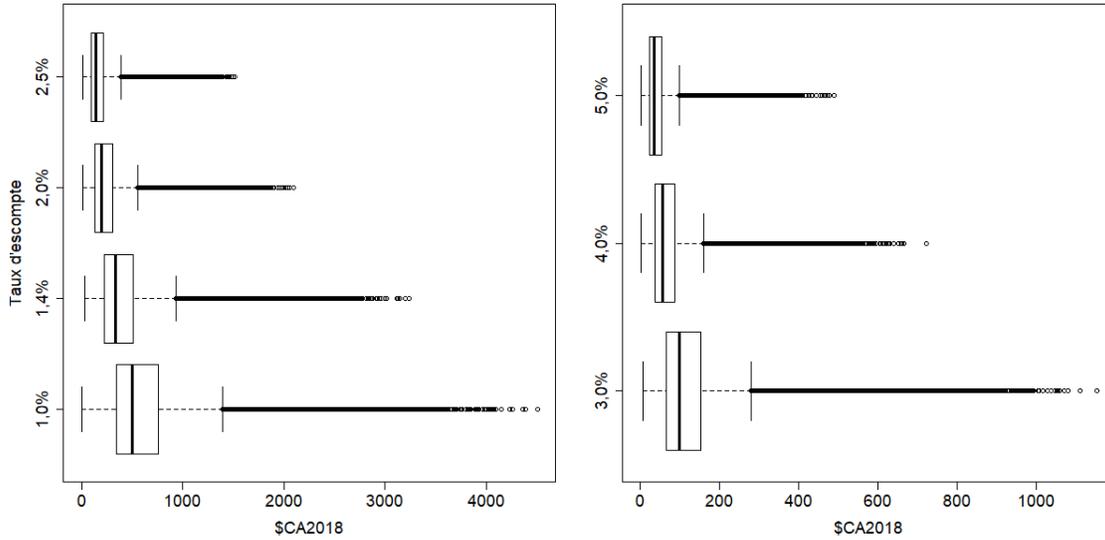
Graphique 31 – Coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) au 95^e centile du PAGE-ICE selon le taux d'escompte et le scénario socioéconomique



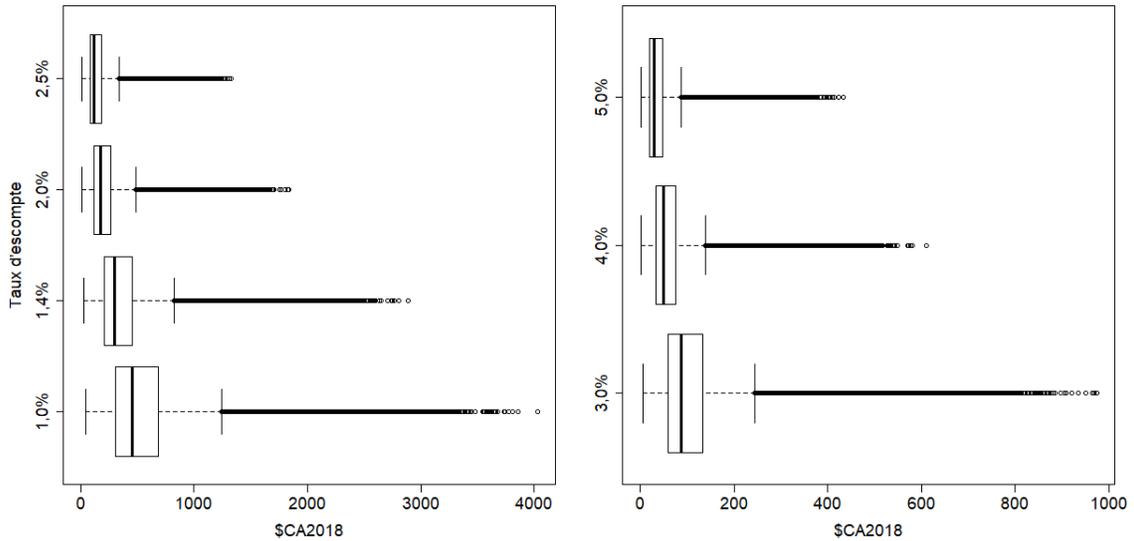
Graphique 32 – Distribution du coût social du carbone en 2020 (\$ CA 2018) du PAGE-ICE selon le taux d'escompte et le scénario socioéconomique



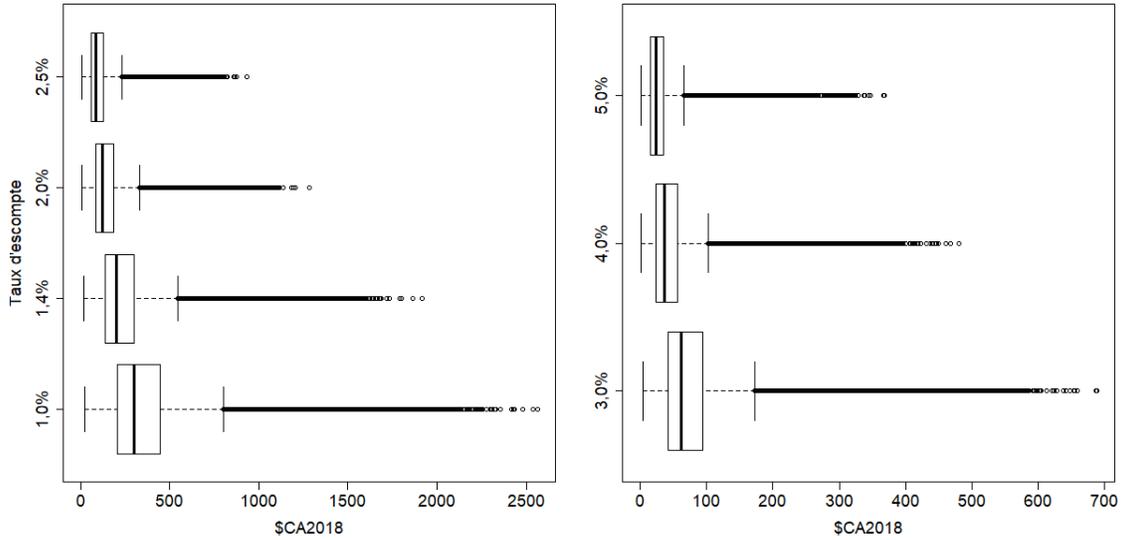
Graphique 33 – Diagrammes en boîte des distributions du coût social du carbone en 2020 du PAGE-ICE (\$ CA 2018) dans le SSP1



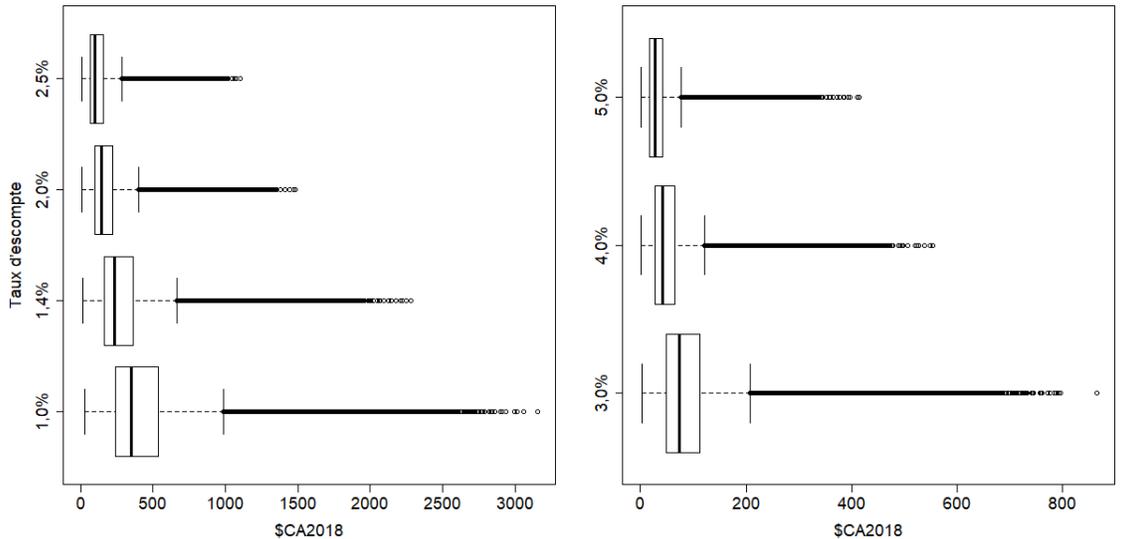
Graphique 34 – Diagrammes en boîte des distributions du coût social du carbone en 2020 du PAGE-ICE (\$ CA 2018) dans le SSP2



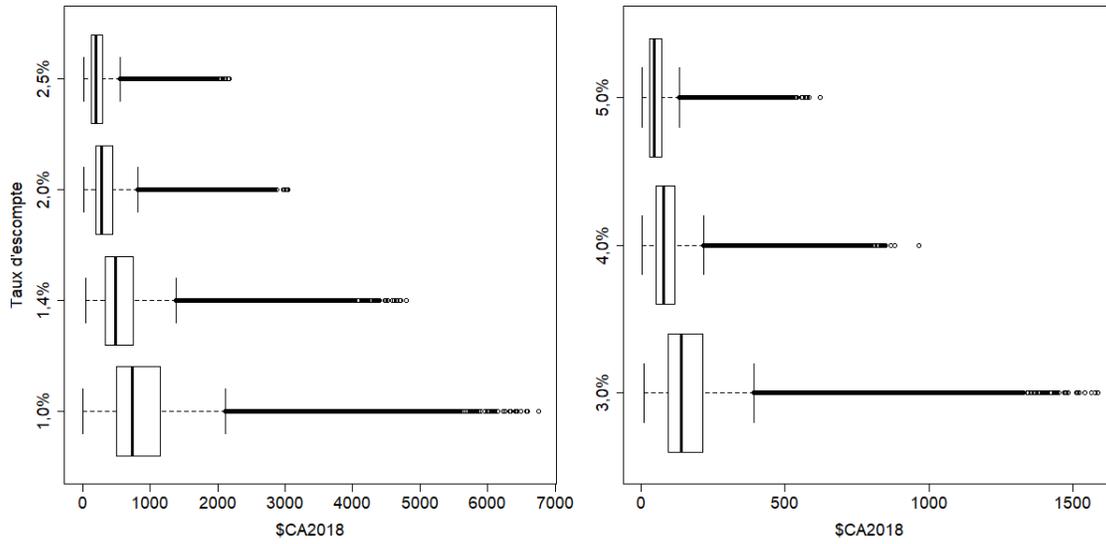
Graphique 35 – Diagrammes en boîte des distributions du coût social du carbone en 2020 du PAGE-ICE (\$ CA 2018) dans le SSP3



Graphique 36 – Diagrammes en boîte des distributions du coût social du carbone en 2020 du PAGE-ICE (\$ CA 2018) dans le SSP4



Graphique 37 – Diagrammes en boîte des distributions du coût social du carbone en 2020 du PAGE-ICE (\$ CA 2018) dans le SSP5



3 Élasticités reliées au transport – Charles Vaillancourt

Le second volet de ce rapport s'intéresse aux élasticités dans le domaine des transports. La première section présente une revue de littérature sur les estimations des élasticités de l'essence, tout en présentant les méthodes économétriques qui sont à la base ces estimations. La deuxième section présente une revue de littérature portant sur des estimations des élasticités pour le transport public / transport en commun. Finalement, la troisième section développe un modèle économétrique pour estimer l'élasticité-prix de l'essence au Québec et dans d'autres provinces canadiennes, en appuyant la méthodologie sur des études présentées dans la première section.

3.1 Élasticité-prix de la demande d'essence

Dans cette première section, nous nous intéressons à l'élasticité-prix de l'essence. Deux grandes catégories d'études ont été réalisées. D'abord, plusieurs études s'appuient sur des données agrégées de marché. Des défis économétriques se présentent alors lorsqu'on estime l'élasticité-prix de la demande d'essence à partir de telles données. Une identification correcte de la demande nécessite donc l'introduction de variables instrumentales. Avant de présenter une revue de la littérature empirique de ces estimations, nous examinons la nature des défis économétriques posés ainsi que leurs solutions.

D'autres études s'appuient sur des données microéconomiques et estiment un système de demande. Un modèle souvent utilisé pour de telles estimations de demande est le modèle AIDS que nous décrivons en détail avant de présenter les estimations dérivées à l'aide de ce modèle.

Tous les résultats empiriques sont résumés dans un tableau dans la conclusion de cette section.

3.1.1 Estimation par régression simple

Il existe un grand nombre de méthodes économétriques qui peuvent permettre à un décideur public de déterminer l'élasticité de la demande d'un bien. La méthode la plus simple serait d'utiliser un logiciel économétrique afin de procéder à une régression directe en

utilisant le modèle suivant :

$$Q = \alpha_0 + \alpha_1 P + \nu,$$

où Q représente la quantité échangée du bien étudié, P représente le prix du bien, β_0 et β_1 sont des estimateurs et ϵ est le terme d'erreur. Une simple transformation logarithmique nous permet d'arriver au modèle suivant :

$$\log Q = \beta_0 + \beta_1 \log P + \epsilon.$$

Cette méthode est très attrayante puisqu'elle représente directement ce qu'est l'élasticité de la demande d'un bien. En effet, dans ce modèle, les variables logarithmiques représentent une variation en pourcentage plutôt qu'en unités absolues. De ce fait, l'estimateur β_1 correspond à l'élasticité-prix, puisqu'il indique la variation en pourcentage de la quantité échangée du bien lorsque le prix de ce dernier augmente de 1%. Il est donc très facile d'estimer ce modèle et de se convaincre que l'estimateur β_1 mesure l'élasticité de la demande.

Or, si ce type de modèle est simple en ce qui a trait à son fonctionnement et à son interprétation, il n'en reste pas moins qu'il ne fonctionne pas. En effet, la valeur de β_1 obtenue sera biaisée. Les prix et quantités observées ne seront pas le résultat de changements de prix le long de la courbe de demande, mais seront plutôt le résultat de l'interaction entre l'offre et la demande du marché pour le bien en question. Autrement dit, d'une perspective économétrique, on comprend qu'il y a une corrélation entre la variable $\log P$ et le terme d'erreur, ce qui biaise l'estimation de β_1 . Il est donc impossible de déterminer l'élasticité de la demande d'un bien en utilisant des données représentant l'équilibre de marché. Cette section présente deux méthodes utilisées pour régler ce problème ainsi que des études démontrant leurs applications.

3.1.2 Problème de Wright et variables instrumentales

Le problème de la régression mentionnée plus tôt est qu'il y a présence d'endogénéité entre la variable de prix et la variable de quantité. Cette situation est appelée *problème de Wright*, en référence à l'économiste Philip Wright et à son travail sur les effets d'un tarif d'importation sur les huiles végétales et animales. C'est pour résoudre ce problème que Wright a développé une approche que l'on connaît aujourd'hui sous le nom de variables instrumentales (VI).

Les variables instrumentales sont utilisées lorsqu'une ou plusieurs variables sont soupçonnées d'être corrélées avec le terme d'erreur. L'utilisation de variables instrumentales permet de séparer l'influence de la variable instrumentée en deux parties : une variation exogène (non-corrélée au terme d'erreur) et une variation endogène (corrélée au terme d'erreur). Il est donc possible, à travers une régression à deux étapes, de séparer ces deux variations en remplaçant la variable instrumentée par une variable instrumentale. Ceci permettra d'obtenir un estimateur non-biaisé pour la variable instrumentée. Pour qu'une variable instrumentale soit considérée comme valide, elle doit satisfaire deux conditions. La première est celle de la pertinence, qui implique que la variable instrumentale doit être corrélée avec la variable que nous cherchons à instrumenter. Cette condition est facile à vérifier avec n'importe quel logiciel économétrique ou statistique. La deuxième condition est celle de l'exogénéité. Cette condition stipule que la variable instrumentale ne doit pas être corrélée avec le terme d'erreur. Autrement dit, la variable instrumentale ne doit avoir aucun effet sur la variable dépendante autrement que par son influence sur la variable qu'elle instrumente. Cette condition est souvent établie par un raisonnement économique théorique puisqu'elle est plus difficile à prouver que la première.

Comment les variables instrumentales permettent-elles de résoudre le problème de Wright ? Dans le cas d'une régression similaire à celle mentionnée plus haut, où l'objectif est de déterminer l'élasticité de la demande d'un bien, le fait d'instrumentaliser la variable $\log P$ avec une ou des variables instrumentales reliées à l'offre du bien permet d'éliminer la corrélation de cette variable avec le terme d'erreur. Puisque ces variables sont corrélées au prix via leur effet sur l'offre du bien (condition de pertinence) et qu'elles n'ont aucun effet sur la demande du bien (condition d'exogénéité), leur utilisation nous permet d'estimer une véritable élasticité de la demande. Autrement dit, sur un graphique d'offre et de demande, instrumentaliser le prix avec des variables instrumentales reliées à l'offre du bien fait en sorte que la variation des variables instrumentales permet d'observer un déplacement de la courbe d'offre. Les variables instrumentales étant exogènes à la courbe de demande, cette dernière ne bouge pas, et donc, toutes les combinaisons de prix et quantités observées se trouvent sur la courbe de demande ; ces combinaisons nous permettent donc d'estimer l'élasticité de la demande du bien.

Asensio et al. (2014)

La première étude à être présentée dans cette revue de littérature est un bon exemple d'application de la méthode des variables instrumentales. En effet, cette étude vise à évaluer l'effet de trois politiques publiques mises en place en Espagne en 2011, du mois de mars au mois de juin, dans le but de réduire la quantité d'essence consommée dans le pays. L'une de ces mesures est une subvention accordée au service de train régional et de correspondance. Les auteurs de cette étude espéraient constater une élasticité-prix croisée positive entre le prix du transport public et la quantité d'essence consommée, désignant ainsi ces deux biens comme des substituts et réaffirmant la principale justification invoquée pour les subventions aux transports publics. Il est important de constater que leur étude permet aussi de calculer l'élasticité-prix de l'essence en Espagne.

Pour ce faire, les auteurs ont colligé des données mensuelles pour 48 provinces espagnoles entre 2008 et 2011. Les données sur la consommation d'essence proviennent de *CORES*, l'organisme dont la mission est de gérer la distribution des réserves pétrolières en Espagne. Quant aux prix mensuels de l'essence, les données ont été fournies par le Ministère de l'Industrie, de l'Énergie et du Tourisme espagnol. Les variables instrumentales utilisées dans cette étude sont le prix du baril de pétrole Brent et le taux d'échange Euro-USD ; les données sur ces variables instrumentales proviennent de la *US Energy Information Administration* et de la Banque centrale européenne respectivement. Enfin, les données sur les variables de contrôle, telles que le stock de voitures, sont tirées du site de la *Direction générale du trafic*, l'organisme responsable de la gestion du trafic automobile en Espagne.

En ce qui a trait à leur modèle, les auteurs de cette étude ont initialement opté pour un modèle basé sur des effets fixes. Dans ce modèle, l'effet d'une réduction de 5% du tarif pour le transport public était représenté par une variable indicatrice prenant une valeur de un pendant la période de la subvention. Or, en raison d'arguments théoriques et de résultats non-significatifs, ils ont adopté par la suite un autre modèle où le prix du transport public est modélisé directement. Le modèle adopté est :

$$\log(Q_{pt}) = X_{pt}\beta + \beta_1 \log Pe + \beta_2 \log Pt + \sigma D_{3-6/11} + \rho Bio_t + \omega_p + \epsilon_{pt},$$

où Q_{pt} représente la quantité d'essence consommée dans la province p à la période t , X_{pt} est un vecteur de variables explicatives pour la demande d'essence, qui inclut, par exemple, le logarithme du stock de véhicules et des variables indicatrices pour les mois, $\log Pe$ représente

le logarithme du prix de l'essence, $\log Pt$ représente le logarithme du prix des transports publics, $D_{3-6/11}$ est une variable indicatrice prenant la valeur de 1 durant les mois de mars à juin 2011, Bio_t représente la proportion de composés biologiques présents dans l'essence à la période t , et ω_p représente les effets fixes des provinces. Les variables $D_{3-6/11}$ et Bio_t sont reliées aux deux autres mesures mises en place par le gouvernement espagnol et ne seront pas discutées dans cette recherche.

Le modèle est estimé selon quatre méthodes différentes : avec effets fixes ou moindres carrés généralisés, avec et sans instrumentalisation. Le prix du baril de pétrole Brent et le taux d'échange Euro-USD sont utilisés pour instrumenter la variable de prix. Cela est un exemple de la méthodologie proposée pour résoudre le problème de Wright : les variables instrumentales sont corrélées au prix de l'essence à travers l'offre d'essence, mais n'ont aucune influence directe sur la demande d'essence. Quant au prix du transport public, un test d'endogénéité Durbin-Wu-Hausman indique que l'hypothèse d'exogénéité entre ce dernier et la quantité d'essence consommée ne peut être rejetée, ce qui élimine la nécessité d'instrumentaliser cette variable.

Pour finir, en ce qui a trait aux résultats, les quatre méthodes utilisées produisent des valeurs de paramètres différentes, mais raisonnablement proches l'une de l'autre, ce qui permet de donner les résultats sous forme d'intervalles. À ce titre, l'étude conclut que l'élasticité-prix croisée de l'essence vis-à-vis du prix du transport public est entre 0,07 et 0,11. Ces résultats sont significatifs à 99%. Selon les auteurs, ce résultat est satisfaisant, non seulement puisqu'il reconferme l'argument économique en faveur des subventions pour le transport public, mais aussi parce qu'il est du même ordre que les précédentes études menées en Espagne sur ce sujet, et ce, même si ces dernières ont eu lieu dans les années 70. Un autre résultat important est l'élasticité-prix de l'essence, qui varie entre $-0,19$ et $-0,23$. Ces résultats sont significatifs à 99%. Les auteurs font finalement remarquer que les élasticités-prix mentionnées dans leur étude sont des élasticités-prix de court terme puisque le stock de véhicules est inclus dans le modèle ; la valeur des élasticités est donc conditionnelle à un stock de véhicules constant. Cette conclusion est aussi supportée par le fait que les mesures ayant été analysées dans cette étude furent dès le début annoncées comme temporaires et n'ont duré que trois à quatre mois.

3.1.3 Modèle AIDS

Description du modèle

Une deuxième solution qui nous permet de déterminer l'élasticité de la demande d'un bien est d'utiliser un modèle microéconomique de demande plutôt qu'une régression directe, ce qui élimine l'endogénéité, qui est la source du problème. À ce titre, l'un des modèles microéconomiques de demande les plus connus est le modèle AIDS (Almost Ideal Demand System), développé par Deaton et Muellbauer (1980). Ce système de demande a comme avantage les propriétés suivantes : il permet une approximation de premier ordre de n'importe quel autre système de demande ; il satisfait les axiomes de la théorie du choix du consommateur (complétude, transitivité, continuité) ; il permet l'agrégation d'agents sans toutefois supposer des courbes d'Engel linéaire ; et peut être utilisé pour tester et imposer des conditions d'homogénéité et de symétrie.

Le modèle AIDS est construit à partir de préférences de type PIGLOG, avec une fonction de dépense qui, pour un niveau d'utilité et un vecteur de prix donnés, détermine la dépense minimale nécessaire pour atteindre le niveau d'utilité en question. La fonction est définie comme suit :

$$\log e(U, p) = (1 - U) \log a(p) + U \log b(p)$$

où U varie entre 0 (subsistance) et 1 (abondance). Les fonctions $a(p)$ et $b(p)$ sont donc considérées comme les fonctions de dépense de la subsistance et de l'abondance respectivement. Ces fonctions sont ensuite spécifiées dans le but d'avoir assez de paramètres pour que n'importe quelle dérivée de ces fonctions puisse être comparée à celle d'un autre modèle quelconque. Les spécifications choisies sont :

$$\log a(p) = \alpha_0 + \sum_i \alpha_k \log p_i + \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \gamma_{ij}^* \log p_i \log p_j,$$

$$\log b(p) = \log a(p) + \beta_0 \prod_k p_k^{\beta_k}.$$

Donc, la fonction de dépense $\log m_t = \log e(p_t, U_t)$ au temps t qui en résulte est :

$$\log m_t = \alpha_0 + \sum_i \alpha_i \log p_{it} + \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \gamma_{ij}^* \log p_{it} \log p_{jt} + U_t \beta_0 \prod_i p_{it}^{\beta_i},$$

où p_{it} est le prix du bien i au temps t , U_t est l'utilité obtenue au temps t , et où α , β et γ^* sont des coefficients. En appliquant le lemme de Shephard à la fonction de dépense et en remplaçant le niveau d'utilité par la fonction d'utilité indirecte, il est possible d'exprimer les fonctions de demandes marshalliennes :

$$x_{it}(p_{it}, m_t) = \frac{m_t}{p_{it}} (\alpha_i + \sum_j \gamma_{ij} \log p_{jt} + \beta_i \log (m_t/P_t)),$$

où $\gamma_{ij} = (\gamma_{ij}^* + \gamma_{ji}^*)/2$ et P_t est un indice de prix translog au temps t défini selon l'expression suivante :

$$\log P_t = \alpha_0 + \sum_i \alpha_i \log p_{it} + \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \gamma_{ij} \log p_{it} \log p_{jt}.$$

Il est possible de réarranger cette équation afin d'exprimer les fonctions de demande en termes de parts de budget :

$$s_{it}(p_t, m_t) = \alpha_i + \sum_j \gamma_{ij} \log p_{jt} + \beta_i \log (m_t/P_t).$$

La théorie microéconomique impose des restrictions sur les valeurs des paramètres. La première restriction est que la somme des parts de budget doit être égale à 1. Cette condition est satisfaite si les trois sous-conditions suivantes sont respectées :

$$\sum_i \alpha_i = 1; \quad \sum_i \beta_i = 0; \quad \sum_i \gamma_{ij} = 0 \quad \forall j.$$

La deuxième restriction est celle d'homogénéité de degré 1 dans les prix et le revenu. Cette condition est satisfaite si :

$$\sum_j \gamma_{ij} = 0 \quad \forall i.$$

La troisième restriction est celle de la symétrie, qui doit être respectée de par l'application du lemme de Shepard à la fonction de dépense :

$$\gamma_{ij} = \gamma_{ji} \quad \forall i, j.$$

Le modèle AIDS est donc un modèle théorique qui permet l'estimation des fonctions de demande en fonction des parts de budget. Afin de pouvoir appliquer ce modèle microéconomique de manière plus pratique, il suffit de remplacer la part du budget si jugée déterministe,

mais inobservable, par la variable stochastique w_i , qui est observable. L'addition d'un terme d'erreur u_{it} en fait un modèle économétrique qui permet d'estimer les fonctions de demande marshalliennes :

$$w_{it} = \alpha_i + \sum_j \gamma_{ij} \log p_{jt} + \beta_i \log (m_t/P_t) + u_{it}$$

Le modèle AIDS requiert d'estimer l'équation de la part du budget pour chaque bien considéré. Puisque la condition dictant que la somme des parts doit nécessairement être égale à 1 est satisfaite, toutes les sous-conditions nécessaires à cette dernière le sont aussi. La résolution du système d'équations généré par le modèle nécessite d'abandonner une des équations du système. En utilisant la condition de la somme des parts de budget étant égale à 1, ainsi que les autres conditions, il est possible de calculer la valeur des coefficients de l'équation abandonnée ; cela implique que le choix de l'équation abandonnée est sans importance. Il est cependant important de noter que puisque la résolution du système d'équations implique l'abandon de l'une d'entre elles, le système se doit de posséder au minimum 3 équations (c'est-à-dire que le modèle est estimé pour au moins 2 biens, avec une troisième catégorie représentant tous les autres biens).

LA-AIDS

Le modèle tel que décrit précédemment peut être modifié afin de donner lieu à différentes spécifications. La modification la plus connue est le modèle LA-AIDS, qui est en fait une approximation linéaire du modèle AIDS. En effet, toutes les équations de demande marshalliennes obtenues dans le modèle sont linéaires, à l'exception de l'indice de prix. Le modèle LA-AIDS remplace cet indice de prix par le *Stone index*. Le modèle LA-AIDS produit alors l'équation suivante :

$$w_{it} = \alpha_i^S + \sum_j \gamma_{ij}^S \log p_{jt} + \beta_i^S \log (m_t/P_t^S) + u_{it}^S,$$

où P_t^S correspond au *Stone Index*, défini comme suit :

$$\log P_t^S = \sum_i w_{it} \log p_{it}.$$

Bien que le modèle LA-AIDS soit plus facile à estimer en raison de sa linéarité, il présente certains problèmes qui doivent être traités. Le premier problème est qu'en utilisant le *Stone*

index, les équations du modèle peuvent présenter un biais d'endogénéité causé par la présence de la part de budget w_{it} des deux côtés de l'équation. Plusieurs solutions ont été proposées pour ce problème. Il est possible d'utiliser dans l'indice de prix les parts de budget $w_{i,t-1}$, c'est-à-dire les parts de budget du bien i de la période précédente :

Une autre solution est d'utiliser une version log-linéaire de l'indice Laspeyres, puisque celui-ci ne dépend pas des parts de budget à chaque période t :

$$\log P_t^L = \sum_k w_{k0} \log \frac{p_{kt}}{p_{k0}}$$

Enfin, une troisième solution serait d'utiliser des variables instrumentales et d'utiliser la méthode 3SLS (Three-Stage Least Squares).

Un deuxième problème du *Stone Index* est que celui-ci n'est pas invariant par rapport aux unités de mesure. Cela veut dire que la façon de mesurer les prix (CAD, USD, EURO) influence la valeur de l'indice. Afin de régler ce problème, plusieurs indices de prix invariants aux unités de mesure peuvent être utilisés ; l'indice log-linéaire de Laspeyres, tel que décrit plus haut, reste une proposition valide en ce sens.

La possibilité d'inconsistance théorique constitue le troisième problème du modèle LA-AIDS. En effet, en assumant une approximation linéaire, et en assumant que la condition selon laquelle la somme des parts de budget est égale à 1, il est possible d'imposer des restrictions sur les paramètres afin d'assurer la propriété d'homogénéité. Or, en ce qui a trait à la propriété de symétrie dans ce modèle, les conditions imposées sur le modèle AIDS $\gamma_{ij} = \gamma_{ji}$ pour obtenir la symétrie permettent de l'atteindre dans le modèle LA-AIDS que si tous les prix sont identiques, ce qui n'est généralement pas le cas, et peut mener à certains problèmes quant au respect de la théorie microéconomique du consommateur. Les conditions de symétrie précédentes $\gamma_{ij} = \gamma_{ji}$ du modèle AIDS ne sont plus suffisantes dans le modèle LA-AIDS parce que l'indice de prix a été modifié dans ce dernier modèle.

Élasticités

Une fois que le système d'équations produites par le modèle est résolu, c'est-à-dire, une fois que tous les paramètres de toutes les équations ont été estimés, il est possible de déterminer l'élasticité-revenu et les élasticités-prix (par rapport à la demande marshallienne) et

de chaque bien avec les formules suivantes :

$$\eta_i = \frac{\partial x_i m}{\partial m x_i} = 1 + \frac{\beta_i}{w_i},$$

$$\Theta_{ij} = \frac{\partial x_i p_j}{\partial p_j x_i} = -\delta_{ij} + \frac{\gamma_{ij}}{w_i} - \frac{\beta_i}{w_i} (\alpha_j + \sum_k \gamma_{kj} \log p_k),$$

où $\delta_{ij} = 1$ si $i = j$, et 0 sinon. Le modèle AIDS permet aussi de calculer des élasticités-prix en rapport avec la demande compensée (ou Hicksienne) :

$$\Theta_{ij}^* = \Theta_{ij} + \eta_i * w_j.$$

Lorsqu'une variante du modèle AIDS est utilisée, les équations d'estimation d'élasticités se doivent d'être modifiées. Pour le modèle LA-AIDS, les élasticités qui résultent de l'utilisation du *Stone index* sont définies comme suit :

$$\eta_i = 1 + \frac{\beta_i}{w_i} \left(1 - \frac{\partial \log P^S}{\partial \log x} \right)$$

$$\Theta_{ij} = -\delta_{ij} + \frac{\gamma_{ij}^S}{w_i} - \frac{\beta_i^S}{w_i} \frac{\partial \log P^S}{\partial \log p_j}.$$

3.1.4 Études utilisant le modèle AIDS

Barros et Prieto-Rodriguez (2008)

L'objectif de cette étude est de déterminer les changements en termes de bien-être de la population en Espagne à la suite d'une proposition de réforme des politiques fiscales dans le domaine des transports. Afin de pouvoir simuler les effets de cette réforme, les auteurs s'intéressent d'abord aux préférences des consommateurs, ce qui les amène à utiliser un modèle AIDS afin de calculer les élasticités dans le domaine des transports.

Les données de cette recherche proviennent du sondage continu sur les dépenses des ménages (ECPF) créé et administré par l'Institut national de statistique d'Espagne. Il s'agit de données de panel fournissant des données trimestrielles et annuelles sur 3200 ménages. Parmi ces ménages, 1/8 de l'échantillon est renouvelé lors de chaque trimestre. En plus d'informations sur les dépenses des ménages, ce sondage collige des données pertinentes sur ces derniers, le statut d'emploi ou des données démographiques étant des exemples. La plage de données s'étend du troisième trimestre de 1985 au quatrième trimestre de 1995.

La spécification précise utilisée est un modèle LA-AIDS. Le modèle fut modifié afin d'inclure un paramètre qui modélise certaines caractéristiques des ménages, telles que le niveau d'éducation du ménage ainsi que le statut d'emploi. Le modèle fut aussi modifié pour prendre en compte les achats non-fréquents ainsi que la saisonnalité des dépenses. Ce modèle comprend 16 classes de bien (15 classes de bien en plus d'une catégorie désignant les autres biens).

Les résultats de cette étude sont nombreux. Tout d'abord, au niveau des élasticités-revenu, l'estimation par le modèle désigne l'essence et les transports publics comme étant des biens de luxe ayant des élasticités-revenu de 1,246 et 1,015 respectivement. De plus, au niveau des élasticités-prix, l'essence est un bien peu élastique avec une élasticité-prix de $-0,817$, et les transports publics sont légèrement élastiques avec une élasticité-prix de $-1,003$. Enfin, en ce qui a trait aux élasticités-prix croisées, ces dernières supportent l'argument selon lequel essence et transports publics sont des substituts : l'élasticité-prix croisée de l'essence par rapport au prix des transports publics est de 0,029, tandis que celle des transports publics par rapport au prix de l'essence est de 0,122.

Nicol (2003)

Bien que le but de cette étude soit d'estimer l'élasticité-prix et l'élasticité-revenu de l'essence au Canada et aux États-Unis, celle-ci se démarque en mettant l'emphase sur deux facteurs influençant la demande d'essence des ménages qui sont souvent absents des estimations traditionnelles : le statut de propriété des ménages ainsi que le nombre d'enfants dans le ménage. Il est important de mentionner que l'étude n'inclut que les ménages où la figure principale est âgée entre 18 et 65 ans et n'est pas considérée comme un travailleur autonome. En plus de permettre une stratification des données par statut de propriété et par nombre d'enfants, l'étude révèle aussi des différences en termes de régions dans les deux pays.

En ce qui a trait aux données utilisées, celles sur le Canada proviennent de deux bases de données produites par Statistique Canada et sont des données annuelles. La première source de données utilisée est le FAMEX, une enquête sur les dépenses des familles canadiennes. L'auteur utilise plusieurs fichiers de micro-données pour la période de 1969 à 1992. Quant aux données sur les prix, elles ont été tirées de plusieurs publications du catalogue *Consumer Price Index* produit par Statistique Canada. Les prix ont été normalisés pour l'année 1978. Quant aux données américaines, celles sur les dépenses proviennent du Consumer Expen-

diture Survey (CEX) administré par le United States Bureau of Labor Statistics. Il s'agit de données mensuelles et annuelles situées entre 1980 et 1992. Les données sur les prix ont été construites et sont le fruit d'une combinaison entre les données sur les indices de prix à la consommation provenant du gouvernement américain et d'autres données fournies par l'American Chamber of Commerce Researchers Association. L'auteur mentionne que tout individu voulant observer ses données peut la contacter directement afin d'en obtenir une copie.

Le modèle utilisé dans cette étude est une variante du modèle QUAIDS, qui est en lui-même une variante quadratique du AIDS. La distinction principale entre le AIDS et le QUAIDS est que ce dernier permet des équations de parts de budget quadratiques dans les dépenses réelles. Au modèle original furent ajoutées des variables telles que l'âge des membres du ménage, la consommation de tabac, le statut d'emploi ou la possession d'une voiture. Afin d'éliminer le problème d'endogénéité avec les parts de budget ainsi que le problème d'achats non-fréquents, certaines variables instrumentales, dont l'âge des membres du ménage au carré et le revenu après taxes, ont été utilisées. Le modèle a été estimé pour six types de biens, dont l'essence, et possède donc sept équations, la septième étant celle pour l'ensemble des autres biens consommés.

Les résultats sont donnés sous forme de tables qui décrivent la valeur de l'élasticité-prix et l'élasticité-revenu pour chaque région et chaque type de ménage. Les écarts-type sont aussi présentés sous les valeurs d'élasticités, rendant possible pour le lecteur une appréciation de la "significativité" des résultats. Il est possible d'observer certains résultats généraux. En effet, l'essence semble être un bien inélastique, tant au niveau du prix que du revenu, autant au Canada qu'aux États-Unis. De plus, la demande pour l'essence est généralement plus sensible aux changements de prix et de revenu au Canada qu'aux États-Unis, ce qui se traduit par des élasticités plus élevées. Enfin, bien que les élasticités, tant au niveau du prix que du revenu, varient entre les régions, les variations les plus importantes sont observées entre types de ménages.

En ce qui a trait aux résultats plus spécifiques, nous pouvons observer que les résultats significatifs montrent que l'élasticité-prix de l'essence au Canada varie entre -0.466 et -0.853 ; l'élasticité-revenu de l'essence, quant à elle, varie entre 0.443 et 0.922 , sauf dans le cas des ménages dits propriétaires ayant un seul enfant, qui ont une élasticité-revenu de $1,296$. Cependant, les ménages de propriétaires avec un seul enfant sont les seuls ménages, tant au Canada qu'aux États-Unis, pour qui l'élasticité-revenu est plus grande que 1. Plus

particulièrement, en étudiant les résultats du Québec, on constate que l'élasticité-prix de l'essence dans la province varie entre -0.397 et -0.894 et que l'élasticité-revenu varie entre 0.365 et 0.93 , à l'exception des ménages propriétaires ayant un seul enfant, qui ont une élasticité-revenu de 1.295 . Il est intéressant de remarquer que les élasticités du Québec et du Canada, même si elles sont différentes, sont relativement du même ordre.

Chang et Serletis (2014)

Bien que le sujet de cette recherche reste la détermination des élasticités de l'essence, les auteurs se démarquent du reste de la littérature en mettant de l'avant l'importance du respect de la théorie microéconomique par les modèles qui prétendent pouvoir estimer des fonctions de demande. À ce titre, les auteurs utilisent trois modèles bien connus d'estimation de demande, soient le modèle AIDS, le modèle QUAIDS ainsi que le modèle Minflex Laurent (ML). Ils rapportent les résultats qui satisfont les restrictions imposées par la théorie microéconomique.

Sur le plan des données, les trois modèles sont estimés pour trois types de bien, soient l'essence, les services de transports locaux et les services de transport entre régions urbaines. Les données sur les dépenses proviennent du sondage sur les dépenses des ménages canadiens, administré par Statistique Canada ; il s'agit de données annuelles recueillies entre 1997 et 2009. Quant aux données sur les prix, les auteurs ont utilisé les indices de prix à la consommation annuels fournis par Statistique Canada, où les indices ont été normalisés pour l'année 2002. Étant données les restrictions que les auteurs imposent sur les données, les provinces maritimes, les territoires canadiens ainsi que la province de Québec ont été exclus de l'étude. Enfin, les ménages ont été classés en trois catégories : ménages constitués d'une seule personne, ménages formés par un couple marié et ménages comprenant un couple marié avec un enfant.

Les auteurs identifient trois conditions que les fonctions d'utilité des consommateurs doivent respecter : la positivité, la monotonie et la concavité (aussi connue sous le nom de *curvature*). Selon les auteurs, toutes fonctions de demande provenant de modèles où les fonctions d'utilité ne respectent pas ces propriétés ne sont pas valides. Dans le cas de cette étude, les conditions de positivité et de monotonie sont en grande partie respectées ; le problème théorique de ces modèles est le respect de la propriété de concavité. Bien que cette propriété puisse être respectée dans certains cas, les auteurs présentent des méthodes pour

imposer la concavité aux modèles. Les modèles sur lesquelles ces méthodes ont été appliquées sont désignés *constraints*.

Les résultats présentés dans cette étude sont donc ceux des modèles respectant les trois propriétés mentionnées plus tôt, c'est-à-dire les modèles où le nombre de violations des trois propriétés est zéro. Après l'imposition de la concavité, on constate que le modèle AIDS ne fonctionne ici que pour la catégorie des ménages formés d'une seule personne, et ce, de manière non-contrainte. Quant au modèle QUAIDS, celui-ci ne fonctionne tout simplement pas selon ce critère, car bien que l'imposition de la concavité réduit le nombre de violations, elle ne les élimine pas toutes complètement, et ce pour tous les types de ménages. Enfin, le modèle Minflex Laurent, lorsque contraint, fonctionne pour tous les types de ménages.

En étudiant donc les résultats du modèle AIDS pour les ménages d'une seule personne ainsi que les résultats généraux du modèle Minflex Laurent, il est possible d'en ressortir les deux résultats principaux, à savoir qu'en fonction de la taille du ménage, l'élasticité-prix de l'essence varie entre -0.57 et -0.75 et que l'élasticité-revenu de l'essence varie entre 0.841 et 0.973 . Tous ces résultats sont significatifs puisqu'ils ont tous une valeur-p pratiquement égale à 0.

3.1.5 Conclusion

Le tableau suivant résume les articles de la section 1 ainsi que leurs résultats. La revue

Étude	Modèle	Type d'élasticité	Élasticité-prix
Asensio et al., 2014	VI	Court terme	Entre $-0,19$ et $-0,23$
Barros et Prieto-Rodriguez, 2008	LA-AIDS	Moyenne	$-0,817$
Nicol, 2003 (Canada)	QUAIDS	Moyenne	Entre -0.466 et -0.853
Nicol, 2003 (Québec)	QUAIDS	Moyenne	Entre -0.397 et -0.894
Chang et Serletis, 2004	AIDS et ML	Moyenne	Entre -0.57 et -0.75

de littérature de cette section a eu comme objectif de présenter deux méthodes d'estimation des élasticités-prix de l'essence. La première est une simple explication de la possibilité d'utiliser des variables instrumentales afin de contourner le problème de Wright, à savoir que les quantités et prix observés ne témoignent pas de la demande d'essence, mais bien de l'équilibre du marché. Cette méthode permet d'estimer une élasticité-prix de court terme.

L'article présenté en exemple de cette méthode révèle que l'essence possède une élasticité-prix de court terme entre $-0,19$ et $-0,23$.

La deuxième méthode présentée est le modèle AIDS, un modèle de demande basé sur les parts de budget et permettant d'estimer une élasticité-prix moyenne. L'un des avantages de ce modèle est le fait que ce dernier possède plusieurs variantes pouvant être utilisées dans différents contextes. La revue de littérature présente des articles utilisant certaines de ces variantes et révèle que l'élasticité-prix moyenne de l'essence varie entre -0.397 et -0.894 . Il en résulte donc que l'essence est un bien dont l'élasticité-prix moyenne est volatile et dépend de plusieurs facteurs, mais elle reste tout de même un bien possédant une demande relativement inélastique.

3.2 Élasticité-prix des transports publics

Les transports publics sont souvent mentionnés comme une des solutions principales au problème des émissions de gaz à effets de serre dans le domaine des transports. En ce sens, plusieurs politiques publiques peuvent inciter la population à substituer leurs voyages en voitures pour l'utilisation du transport en commun. Il devient alors important de pouvoir estimer les élasticités des transports publics, en particulier l'élasticité-prix, afin de mieux prévoir les impacts de ces politiques publiques.

De Rus (1990)

Cette étude cherche à produire une estimation des élasticités dans le domaine des transports par autobus en Espagne. Puisque l'étude se concentre sur le transport en autobus, les deux plus grandes villes d'Espagne, Madrid et Barcelone, en sont exclues, leur système de transport en autobus étant grandement intégré à d'autres systèmes de transport en commun tels qu'un réseau de métro et des transports interurbains. Les services de transports en autobus d'une ville ne sont pas fournis par les gouvernements municipaux ; ces derniers octroient plutôt une franchise à une compagnie privée qui est responsable de la gestion du service.

Les données utilisées dans cette étude sont des données agrégées sur plusieurs variables, notamment le nombre de voyages effectués par les passagers, la distance parcourue par les autobus, les prix de droits de passage, etc. Ces données proviennent de onze villes différentes ; elles ont été récoltées sur une base mensuelle entre janvier 1980 et mai 1988. Il est cependant

important de mentionner que les données n'existent pas pour tous les mois pour chaque ville étudiée ; le nombre maximal d'observations pour une ville est de 101. De plus, sur les onze villes en question, quatre d'entre elles furent en mesure de fournir des données désagrégées fournissant de l'information sur le type de passage utilisé entre un passage simple et un forfait de passages multiples.

Le modèle utilisé est le suivant :

$$q_{jt} = \alpha f_{1t}^{\gamma_{j1}} f_{2t}^{\gamma_{j2}} B_t^{\beta_j} \exp(\gamma_{jt} T_t + \sum_i \lambda_i D_i + \omega_i H_i) \epsilon_t$$

où :

q_{jt} représente le nombre de passages par mois avec un passage simple ($j = 1$) ou un forfait de passages multiples ($j = 2$) ;

f_{1t} est le prix réel d'un passage avec un ticket simple ;

f_{2t} est le prix réel d'un passage avec un forfait de passages multiples ;

B_t est le nombre de véhicules-kilomètres par mois ;

T_t est le terme de tendance dans le temps ;

D_i représente un ensemble de variables indicatrices pour tous les mois sauf un ;

H_i est une variable indicatrice représentant les arrêts de services majeurs ;

ϵ_t est le terme d'erreur.

L'estimation est effectuée sur ce modèle après avoir pris le log des deux côtés de l'équation de sorte que le coefficient γ_{jk} est l'élasticité-prix du service $j = 1, 2$ en fonction du prix du service $k = 1, 2$.

Ce modèle est considéré statique, et suppose donc un ajustement immédiat entre les tarifs et les quantités de voyages réalisées. Afin de pouvoir faire une distinction entre les élasticités de court et de long terme, on ajoute au modèle une structure de retards d'une période ; autrement dit, toutes les variables initialement présentes dans le modèle et faisant référence à une période précise dans le temps sont de nouveau ajoutées au modèle, mais faisant référence cette fois-ci à la période précédente. Dans le cas des données désagrégées, le modèle prend également en compte les deux types de passages, et permet alors d'analyser les effets d'un changement de prix sur la demande de manière plus détaillée.

En ce qui a trait aux résultats, il est intéressant de remarquer que même si le nombre d'observations pour chaque ville n'est pas particulièrement élevé (le maximum étant 101), les résultats sont, en grande majorité, très significatifs, tel que le démontrent les statistiques- t mentionnées dans les tableaux de résultats. Au niveau des élasticités-prix (le prix étant

ici le tarif d'un voyage en autobus), le modèle statique montre qu'entre les villes étudiées, l'élasticité-prix du transport public varie entre $-0,16$ et $-0,41$. Quant au modèle dynamique, les résultats ne sont pas si différents de ceux du modèle statique, puisque l'élasticité-prix de court terme varie entre $-0,20$ et $-0,39$; ils se distinguent cependant au niveau de l'élasticité-prix à moyen terme, qui varie entre $-0,33$ et $-0,66$.

Des résultats sont aussi avancés sur l'élasticité de service, qui mesure la variation, en pourcentage, de voyages en fonction d'une augmentation de 1% du niveau du service, le service étant mesuré par le nombre de kilomètres effectués par les véhicules publics en un mois. Le modèle statique démontre une élasticité de service variant entre $0,34$ et $1,26$ en fonction des villes. De même, le modèle dynamique fait la différence entre l'élasticité de service de court terme et celle de moyen terme. L'élasticité de service à court terme varie entre $0,26$ et $1,54$, tandis que celle de moyen terme varie entre $0,39$ et $1,88$.

Finalement, l'analyse des données désagrégées pour les quatre villes ayant fourni des données à ce sujet révèle que l'élasticité-prix des passages uniques varie entre $-0,73$ et $-1,16$. L'élasticité-prix du forfait aux passages multiples, quant à elle, varie entre $-0,83$ et $-2,25$. La différence entre ces élasticités et les élasticités obtenues à partir des données agrégées est due au fait que ces dernières ne prennent pas en compte les effets de changements entre les deux types de passages lors de modifications de prix. À ce sujet, les analyses réalisées dans l'étude montrent que l'élasticité-prix croisée entre le prix d'un passage simple et la quantité de passages provenant d'un forfait de passages multiples varie entre $0,71$ et $0,87$; inversement, l'élasticité-prix croisée entre le prix d'un forfait de passages multiples et la quantité de passages simples varie entre $0,57$ et $0,77$.

Deb et Filippini (2013)

Dans cette étude, les auteurs s'intéressent aux différentes élasticités du réseau d'autobus en Inde. Leurs motivations sont nombreuses : un bon réseau d'autobus est de plus en plus nécessaire en raison non seulement de la croissance économique rapide du pays qui crée de nouveaux besoins en ce qui concerne la mobilité et l'intégration des différentes communautés rurales afin de les faire profiter de l'activité économique. Les problèmes de pollution atmosphérique et sonore ne sont pas à négliger non plus, le secteur du transport étant un des principaux contributeurs aux émissions de gaz à effets de serre en Inde. L'ensemble du transport public par autobus est opéré par des compagnies qui sont la propriété du gouver-

nement.

Les données utilisées dans cette étude proviennent du *Central Institute of Road Transport*. Elles proviennent d'un panel de 22 états indiens s'étalant de 1990 à 2001. Tous les états n'ont cependant pas fourni des données pour l'ensemble de la décennie en question, le résultat étant un panel incomplet. Ce dernier contient 206 observations au total et varie entre un minimum de 16 états pour une année donnée, et un maximum de 21 états pour une autre année.

Le modèle utilisé dans cette étude est un modèle double-log linéaire, ce qui permet donc d'interpréter directement les coefficients de certaines variables comme étant des élasticités. Le modèle possède une spécification statique et dynamique. Le modèle statique possède la spécification suivante :

$$\log pkm_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \log p_{it} + \alpha_2 \log r_{it} + \alpha_3 \log d_{it} + \alpha_4 \log v_{it} + \alpha_5 \log pop_{it} + \alpha_6(pt_{it}) + \alpha_7(ta_{it}) + \epsilon_{it},$$

où :

pkm_{it} représente les kilomètres-passagers ;

p_{it} est le prix d'un passage pour le transport public ;

r_{it} est le revenu moyen ;

d_{it} est la densité de couverture ;

v_{it} représente la quantité de voitures par personne ;

pop_{it} est une mesure de la population ;

pt_{it} est la proportion de la population faisant partie de la population active ;

ta_{it} est le taux d'alphabétisation de la population ;

ϵ_{it} est le terme d'erreur.

La spécification du modèle dynamique est identique mis à part l'ajout d'un terme traduisant les quantités de kilomètres-passagers observées à la période précédente. Sur le sujet des estimateurs utilisés, un modèle statique pour des données de panel peut utiliser un estimateur d'effets aléatoires ou d'effets fixes. Les auteurs, en raison de plusieurs tests et propriétés de ces estimateurs, ont décidé de rapporter les résultats des deux estimateurs. En ce qui a trait au modèle dynamique, les auteurs ont choisi d'utiliser l'estimateur LSDV (Least Squares Dummy Variable) corrigé.

Au niveau des résultats, le modèle utilisé, en plus de permettre d'estimer l'élasticité-prix du transport en autobus, fournit aussi des renseignements sur l'élasticité-revenu et l'élasticité en rapport avec la qualité du service, soit en relation avec la densité de couverture. En situation statique, l'estimateur d'effets aléatoires propose une élasticité-prix moyenne de

$-0,289$, une élasticité-revenu moyenne de $-0,033$ et une élasticité moyenne en lien avec la qualité du service de $0,867$. L'estimateur d'effets fixes propose des résultats similaires, c'est-à-dire une élasticité-prix moyenne de $-0,232$, une élasticité-revenu moyenne de $0,059$ et une élasticité moyenne en lien avec la qualité du service de $0,847$. Le modèle laisse donc croire que l'essence est un bien avec une demande inélastique. Cependant, bien que l'élasticité-prix et l'élasticité de la qualité du service soient significatives à 99% pour les deux estimateurs, ce n'est pas le cas de l'élasticité-revenu, dont l'estimation n'est pas significative.

Enfin, le modèle dynamique donne une élasticité-prix de court terme de $-0,374$, une élasticité-revenu de court terme de $0,027$ et une élasticité en lien avec la qualité du service de court terme de $0,676$. Le modèle permet aussi une analyse du long terme en révélant une élasticité-prix de long terme de $-0,523$, une élasticité-revenu de long terme de $-0,038$ et une élasticité en lien avec la qualité du service de long terme de $0,957$. Le modèle dynamique produit le même résultat que le modèle statique, c'est-à-dire des valeurs d'élasticité-revenu non-significatives et des valeurs significatives pour les deux autres élasticités discutées, et ce, tant pour le court terme que pour le long terme.

Tsai et Mulley (2014)

Cette recherche se concentre sur la détermination des élasticités de court terme et de long terme des transports publics, plus précisément des autobus et des trains, dans la grande région métropolitaine de la ville de Sydney en Australie. Elle se démarque cependant d'autres études portant sur le même sujet en utilisant des données de pseudo-panel. En effet, les auteurs soutiennent que le principal obstacle dans la cueillette de données pour des études sur les habitudes de déplacement des gens est qu'il est difficile d'obtenir des données de panel, qui sont idéales pour déterminer les comportements à court et long terme d'un individu suite à un changement quelconque. Or, toujours selon les auteurs, ces données sont rares et difficiles à obtenir en raison de contraintes de budget et d'échantillonnage. La solution alternative d'utiliser des données sous forme de séries temporelles agrégées est souvent possible, mais ne fournit aucune information sur les habitudes de déplacement individuelles. La méthode de pseudo-panel permet de contourner ces problèmes. Elle consiste à assigner les individus impliqués dans la collecte de données dans des groupes distincts, où chaque groupe est défini selon un critère ne variant pas dans le temps, tel que l'année de naissance. À l'intérieur de ces groupes sont formées des cohortes, c'est-à-dire des sous-groupes d'indi-

vidus qui respectent le critère du groupe pendant la période où ils participent à la collecte de données. Lors de la collecte de données, les groupes sont alors considérés comme les unités d'un panel, et la moyenne de la cohorte qui représente ce groupe pendant une certaine période devient l'observation de l'unité pour cette période. Les groupes et cohortes doivent donc être constitués de manière à maximiser l'homogénéité dans les cohortes et de manière à maximiser l'hétérogénéité entre les groupes.

Les données de cette recherche proviennent du SHTS (*Sydney Household Transport Survey*, produit par le *Bureau of Transport Statistics of the New South Wales Department of Transport*. Il s'agit d'un sondage réalisé chaque année et fournissant des données annuelles sur les habitudes de déplacements des individus résidants dans la grande région métropolitaine de Sydney. Les auteurs ont pu compter sur 13 années consécutives de données provenant de ce sondage. Ce dernier compte 8500 individus répartis dans 3500 ménages et offre de l'information non seulement sur les habitudes de déplacement des individus, mais aussi sur leur ménage et sur leurs caractéristiques individuelles. Ce sondage définit la demande pour le transport public comme étant le nombre moyen de déplacements en transport public (bus ou train) par un voyageur par jour. Les critères utilisés pour former des groupes pour le pseudo-panel sont l'année de naissance et la distance entre le ménage du répondant et le quartier des affaires de Sydney.

Le modèle choisi par les auteurs est un modèle double-log linéaire, où les coefficients obtenus peuvent être directement interprétés comme des élasticités. La spécification du modèle statique est la suivante :

$$D_{it} = \beta_0 + \beta_p P_{it} + \beta_E E_{it} + \beta_S S_{it} + \beta_L L_{it} + \epsilon_{it},$$

où :

D_{it} est le nombre de voyages en transport en commun effectué par des usagers par jour ;

P_{it} est le prix d'un voyage en transport en commun ;

E_{it} est un vecteur de variables socio-économiques ;

S_{it} est le niveau de service du transport en commun ;

L_{it} est un vecteur de variables reliées à l'organisation spatiale du réseau ;

ϵ_{it} est le terme d'erreur.

Le modèle dynamique utilisé est un modèle d'ajustement partiel, c'est-à-dire un modèle identique au modèle statique, dans lequel le logarithme de la quantité consommée à la période précédente est ajouté comme variable explicative. Quant aux types d'estimateurs utilisés, les

auteurs discutent l'utilisation d'estimateurs à effets fixes et d'estimateurs à moindres carrés ordinaires. Toujours selon les auteurs, la littérature sur le sujet des pseudo-panels a démontré que l'estimateur à moindres carrés ordinaires est préféré à celui à effets fixes lorsqu'il existe une plus grande variation entre les groupes qu'entre les données pour un même groupe, ce qui est le cas de cette étude. En d'autres mots, l'estimateur à effets fixes ne prend en compte que les variations à l'intérieur des groupes, ignorant ainsi celles entre les groupes. Pour cette raison, l'estimateur choisi est l'estimateur à moindres carrés ordinaires. Or, pour ce qui est du modèle statique, un test de Ramsay laisse croire que les estimateurs souffriraient d'un biais par variable omise ; les auteurs ont donc décidé d'abandonner le modèle statique, et seuls les résultats du modèle dynamique par moindres carrés ordinaires sont considérés comme fiables.

Le modèle dynamique présente beaucoup de résultats, les plus importants dans le cadre de cette revue de littérature étant les élasticités-prix à court et long terme. À court terme, le modèle dynamique estime l'élasticité-prix des transports publics à $-0,21$. Ce résultat est significatif à 99%. Le coefficient λ , qui décrit l'effet de la demande à la période précédente sur celle de la période présente, est égal à 0,225 et est aussi significatif à 99%. Cette étude définit le long terme et l'élasticité-prix de long terme à l'aide des formules suivantes :

$$e_k^{LR} = \frac{e_k^{SR}}{1 - \lambda}$$

$$T = \frac{\log(1 - A)}{\log \lambda},$$

où e_k^{LR} est l'élasticité de long terme, e_k^{SR} est l'élasticité de court terme, T est le nombre d'années nécessaires pour atteindre le long terme, et A est le pourcentage d'ajustement de la demande requis pour pouvoir considérer que l'ajustement a atteint son niveau de long terme. Dans le cas de cette étude, les auteurs considèrent qu'un ajustement de 95% constitue un ajustement de long terme.

Selon ces formules, l'élasticité-prix à long terme est estimée à $-0,26$, tandis que l'horizon de long terme est défini comme étant deux ans. Les auteurs clarifient l'interprétation de ces chiffres en mentionnant que si le prix des transports publics augmente de 100%, alors le nombre de voyages effectués en moyenne diminuera de 21% à court terme et de 5% entre le court terme et le long terme, pour finalement atteindre une diminution totale de 26% à long terme.

Enfin, les élasticités de service sont définies ici comme la variation de la demande de

transport public lorsque la fréquence des trains et autobus augmente de 1%. L'estimation réalisée propose une élasticité de service de court terme et de long terme égales à 0,10 et 0,13 respectivement. Cependant l'élasticité de long terme n'est pas significative, tandis que celle de court terme ne l'est qu'à un niveau de 90%.

3.2.1 Conclusion

Le tableau suivant résume les principaux résultats des études analysées sur le sujet de l'élasticité-prix des transports publics. Les estimations obtenues sont plus ou moins consis-

Étude	Type d'élasticité	Élasticité-prix
De Rus, 1990	Moyenne, court et long terme	Moyenne : entre $-0,16$ et $-0,41$ Court terme : entre $-0,20$ et $-0,39$ Long terme : $-0,33$ et $-0,66$ Passages uniques : entre $-0,73$ et $-1,16$ Forfait : entre $-0,83$ et $-2,25$
Deb et Filippini, 2013	Moyenne, court et long terme	Moyenne : entre $-0,232$ et $-0,289$ Court terme : $-0,374$ Long terme : $-0,523$
Tsai et Mulley, 2014	Court et long terme	Court terme : $-0,21$ Long terme : $-0,26$

tantes entre les différentes études. Il est cependant important de rappeler que les différences entre les résultats peuvent être causées par plusieurs facteurs, notamment la nature des données, mais aussi par les spécifications des modèles économétriques utilisés ainsi que la définition du transport public utilisée. Quoi qu'il en soit, l'ensemble des études recensées dans cette section suggèrent que le transport public est un bien avec une demande inélastique pouvant varier de manière substantielle entre le court et le long terme, ce qui devrait être pris en compte lors de toute élaboration de politique publique à ce sujet.

3.3 Estimation des élasticités au Québec

À la lumière des études recensées dans les précédentes sections, il devient pertinent de chercher à estimer les élasticités de l'essence au Québec à l'aide des méthodes et techniques

utilisées dans ces recherches. En effet, il est vital de pouvoir estimer ces élasticités afin de prévoir adéquatement les effets de politiques publiques visant à affecter la consommation d'essence ou de transports publics dans une perspective plus large de réduction des émissions de gaz à effets de serre. Pour des raisons de faisabilité et d'accès aux données, cette section reprendra la méthodologie de la recherche conduite en Espagne en utilisant des variables instrumentales (Asensio et al., 2014). La même méthodologie sera appliquée à l'Ontario et la Colombie-Britannique à des fins de comparaisons et de critique de la méthodologie.

3.3.1 Données et méthodologie

Un des obstacles à l'estimation des élasticités dans le domaine des transports au Québec est l'obtention de données. Une base de données fut donc construite spécifiquement pour l'estimation réalisée dans cette étude. Les estimations économétriques ont été réalisées à l'aide du logiciel STATA. Cette base de données, ainsi que le code STATA utilisé, est disponible sur demande.

Les données utilisées sont des données de panel mensuelles entre janvier 1999 et novembre 2018, mis à part les mois de mai et d'août 2004 qui ont été abandonnés pour cause d'erreurs statistiques. Le panel compte donc 237 observations. L'ensemble des données provient de différentes enquêtes de Statistique Canada, à l'exception de deux variables, soit le prix du baril de pétrole WTI et le taux de change.

Le modèle utilisé s'inspire directement d'Asensio et al. et constitue un modèle double-log linéaire, où les coefficients peuvent directement être interprétés comme des élasticités. La spécification générale du modèle est la suivante :

$$\log Q_{it} = \log \text{Prixreel}_{it} + \log \text{stockauto}_{it} + \log \text{stockmoto}_{it} + \log \text{PIB}_{it} + \text{Mois} + \epsilon_{it},$$

où :

Q_{it} est la quantité d'essence consommée ;

Prixreel_{it} représente le prix réel de l'essence ;

stockauto_{it} est la quantité d'automobiles enregistrées dans la province ;

stockmoto_{it} est la quantité de motos enregistrées dans la province ;

Mois représente un ensemble de variables indicatrices pour tous les mois, à l'exception du mois de janvier ;

ϵ_{it} est le terme d'erreur.

Les données sur les quantités sont tirées de l'enquête sur l'approvisionnement et l'utilisation de produits pétroliers raffinés. Plus précisément, il s'agit des ventes d'essence nettes au détail mensuelles.

Le modèle utilise des prix réels afin de respecter la théorie microéconomique selon laquelle ces derniers seraient les vrais déterminants de la demande, et non les prix nominaux. Les prix réels sont ici calculés comme étant les prix nominaux divisés par les IPC correspondants. Les prix nominaux proviennent de l'enquête sur le prix moyen mensuel de l'essence et du mazout. Pour chaque province, les prix utilisés sont ceux de la ville avec la plus grande population ; il s'agit donc de Montréal, Toronto, Calgary et Vancouver. Les IPC utilisés pour effectuer la transformation en prix réels sont l'IPC national ainsi que les IPC provinciaux. L'IPC du Canada est désaisonnalisé, ce qui n'est pas le cas des IPC provinciaux.

Afin de respecter la méthodologie de laquelle cette estimation s'inspire, le prix du baril de pétrole est utilisé comme variable instrumentale. L'étude originale s'intéressait à la situation espagnole, et utilise donc le prix du baril de pétrole Brent. Afin d'adapter correctement le modèle, le prix du baril de pétrole utilisé sera celui ayant la plus grande influence sur le continent nord-américain, soit le prix du baril de pétrole *West Texas Intermediate* (WTI). Ces prix ont été téléchargés de la *U.S. Energy Information Administration*. Une autre variable instrumentale utilisée est le taux de change CAD-USD, qui fait écho à l'utilisation du taux de change EUD-USD dans la recherche originale. Puisque la Banque du Canada n'a commencé à fournir ses données à Statistique Canada qu'en 2017, les taux de change utilisés sont ceux reportés par la compagnie OFX sur leur site Internet.

Quant aux données concernant les stocks de véhicules automobiles et de motocyclettes, ces dernières proviennent de l'enquête sur l'immatriculation de véhicules par type de véhicule. Il est pertinent de préciser que, dans le cadre de cette estimation, le stock de véhicules automobiles comprend l'ensemble des véhicules automobiles routiers à l'exception du stock de motocyclettes. Puisque les données sur ces deux variables sont une moyenne annuelle, les observations annuelles ont été considérées comme les observations du mois de juin de l'année correspondante. Afin de construire des données mensuelles, une croissance linéaire fut supposée entre chaque mois de juin.

Les données sur le PIB ont été prélevées de l'enquête sur le PIB aux prix de base par industrie. Comme il s'agit aussi de données annuelles, la démarche appliquée sur les stocks de véhicules automobiles et de motocyclettes a été répétée. Enfin, une variable indicatrice

pour chaque mois, excepté le mois de janvier, a été ajoutée au modèle.

3.3.2 Spécifications et interprétations

Afin de bien comprendre les différentes estimations d'élasticités qu'il est possible d'obtenir, plusieurs spécifications du modèle général présenté plus tôt seront estimées, chacune avec leur interprétation propre. Les variations entre les différentes spécifications porteront sur l'utilisation de variables instrumentales, les IPC utilisés pour calculer les prix réels ainsi que la décision à savoir si les IPC sont désaisonnalisés.

Puisqu'il reste un point de référence, le modèle général, c'est-à-dire sans instrumentali-sation et qui utilise l'IPC du Canada, constitue la première spécification. Tel qu'expliqué dans la première section, il est raisonnable de penser qu'une relation de simultanéité existe entre les quantités et les prix réels, ce qui biaise les estimations des coefficients. Ces derniers ne sont donc pas considérés comme des résultats fiables, mais servent plutôt à des fins de comparaison avec les coefficients des autres spécifications afin de pouvoir observer les effets de l'endogénéité.

La deuxième spécification est similaire à la première, à la différence que la variable du log du prix réel est maintenant instrumentée par le prix réel du baril de pétrole WTI et par le taux de change. Puisque la variable de prix est instrumentée de la même manière que dans l'étude originale, l'endogénéité causée par le problème de Wright devrait être éliminée par l'instrumentalisation de la variable de prix par des variables reliées à l'offre d'essence. L'IPC utilisé dans cette spécification reste celui du Canada. La spécification est donc spécialement utilisée pour éliminer l'endogénéité présente dans la première spécification.

La troisième spécification continue d'utiliser les variables instrumentales. Cette spécification est particulière du fait que l'IPC utilisé pour calculer les prix réels n'est plus celui du Canada, mais bien celui de chaque province individuelle. Le but est de créer des prix réels plus représentatifs de la réalité individuelle de chaque province. Cependant, il faut rappeler que les IPC provinciaux ne sont pas désaisonnalisés, et que leur utilisation, si on accepte qu'elle permette en théorie un résultat plus précis pour chaque province, introduit un nouveau problème, celui de la saisonnalité.

Suite à cette situation, la quatrième spécification cherche à régler ce problème. Cette spécification a pour but de désaisonnaliser les IPC pour ensuite les réutiliser dans la troisième

spécification. En particulier, la première étape est de régresser les IPC de chaque province sur l'ensemble des mois. Puisqu'une régression cherche fondamentalement à montrer comment les régresseurs (ici, les variables indicatrices pour les mois) expliquent la variation de la variable expliquée (ici, l'IPC de la province), il suffit ensuite de récupérer les résidus de la régression. Par définition, ces résidus correspondent aux valeurs des IPC purgés de l'influence des mois, et donc purgés de la saisonnalité. Il suffit ensuite de régresser les résidus sur l'ensemble des variables autres que les variables indicatrices, en n'oubliant pas de toujours instrumentaliser la variable de prix réel.

3.3.3 Résultats, interprétation et discussion

Le tableau suivant présente les estimations des élasticités-prix des différentes spécifications. Ces estimations sont accompagnées de leur valeur d'écart-type afin de permettre de discuter de la "significativité" des résultats. Plus précisément, les valeurs accompagnées d'un astérisque sont significatives à un niveau de 95%.

Spécification	Québec	Ontario	C.-B.
Sans instrumentalisation, IPC Canada	-0,113* (0,032)	-0,048 (0,033)	-0,354* (0,034)
Avec instrumentalisation, IPC Canada	-0,123* (0,034)	-0,030 (0,037)	-0,414* (0,039)
Avec instrumentalisation, IPC provinciaux non-désaisonnalisés	-0,125* (0,035)	-0,030 (0,037)	-0,412* (0,039)
Avec instrumentalisation, IPC provinciaux désaisonnalisés	0,022 (0,044)	-0,011 (0,055)	0,065 (0,054)

Il est à noter que tout comme l'étude originale, notre modèle prend en compte les effets d'un changement de prix sur les quantités d'essence consommée en gardant toutefois le nombre de véhicules et de motos constants. En ce sens, toutes les élasticités qui résultent de notre modèle sont des élasticités de court terme.

Les élasticités de court terme par rapport à l'IPC canadien, bien que biaisées par l'endogénéité causée par le problème de Wright, sont significatives dans le cas du Québec et de la Colombie-Britannique.

Les constats tirés de la première régression sont tout aussi vrais en ce qui concerne les

résultats de la deuxième régression. Les différences entre les élasticités-prix de court terme par rapport à l'IPC canadien de la première et de la deuxième régression sont variables selon les provinces. Par exemple, l'instrumentalisation des données québécoises ne provoque qu'une faible variation de 0,01 de la valeur de l'élasticité-prix, contre 0,06 pour la Colombie-Britannique. Cela laisse croire que le problème d'endogénéité créé par le problème de Wright n'a pas la même ampleur partout au Canada.

Dans le cas de la troisième spécification, l'interprétation de l'élasticité-prix se doit d'être exacte : il s'agit de l'élasticité-prix de court terme par rapport à l'IPC provincial non-désaisonnalisé. Encore une fois, il est possible d'observer que les résultats ne varient pas beaucoup par rapport à la spécification précédente. Les résultats plus généraux sont d'ailleurs maintenus : les élasticités-prix sont significatives au Québec, très significatives en Colombie-Britannique, ne sont pas significatives en Ontario.

La quatrième spécification produit des résultats décevants. En effet, aucune des élasticités-prix à court terme par rapport à l'IPC provincial désaisonnalisé ne produit d'estimations pouvant être jugées significatives.

Devant ces résultats, le constat est que le modèle attribue au Québec et à la Colombie-Britannique plusieurs types d'élasticités-prix à court terme variant entre $-0,113$ et $-0,125$ et entre $-0,354$ et $-0,414$ respectivement. La Colombie-Britannique semble être la province où les élasticités-prix de l'essence sont les plus élevées. Pour toutes provinces, les résultats vont dans le sens de la théorie et décrivent l'essence comme un bien ayant une demande inélastique.

En ce qui a trait à la quatrième spécification, la désaisonnalisation des IPC semble avoir rendu le modèle inapplicable. S'il est admis qu'il est désirable d'utiliser des IPC désaisonnalisés, il serait intéressant de désaisonnaliser les IPC par une autre méthode afin de vérifier si les problèmes de cette spécification sont bel et bien attribuables à ces derniers. Le filtre X-13, développé par le *United States Census Bureau*, fut considéré pour cette estimation, mais fut abandonné pour des raisons de faisabilité.

Finalement, puisque cette régression a pour but d'estimer des élasticités-prix, une attention particulière se doit d'être portée à l'endroit des données sur les prix. Tel que mentionné plus tôt, les prix nominaux utilisés pour calculer les prix réels sont les prix moyens observés dans la plus grande région urbaine de chaque province à une période donnée. Or, s'il est admis que ces prix sont ceux auxquels la majorité de la population de chaque province fait

face, il est probable que ces prix ne s'appliquent pas aux habitants d'autres localités. En supposant que cela est possible, il serait pertinent de construire et d'utiliser un prix moyen pour les provinces en fonction des prix des localités et des poids démographiques de ces dernières dans leur province.

3.3.4 Conclusion

En somme, dans le but de répliquer une des études présente dans la revue de la littérature sur l'élasticité-prix de l'essence, une base de données et un code STATA ont été mis sur pied. Le modèle économétrique utilisé cherchait à estimer différentes élasticités-prix de court terme pour le Québec ainsi que trois autres provinces canadiennes. En ce qui a trait au Québec, l'analyse économétrique suggère que l'élasticité-prix de court terme de l'essence varie entre $-0,113$ et $-0,125$, ce qui fait de l'essence un bien très inélastique.

3.4 Conclusion

Dans cette partie de la recherche, une revue de la littérature ayant comme principal sujet les élasticités-prix de l'essence et des transports publics a été effectuée. Le principal constat est que les méthodes d'estimation de ces élasticités sont aussi nombreuses que le nombre d'études sur le sujet. Malgré cela, la littérature économique semble s'entendre sur le fait que les deux biens sont des biens inélastiques. Cette conclusion est partiellement confirmée par une toute nouvelle estimation mise sur pied spécifiquement pour cette recherche. Il en ressort aussi qu'il existe une différence significative entre les élasticités-prix de court et long terme.

Toutes ces conclusions doivent être prises en compte dans le cadre de l'élaboration de nouvelles politiques publiques qui ont comme objectif d'influencer les prix de ces biens afin de réduire les émissions de gaz à effets de serre dans le domaine des transports au Québec. Afin d'améliorer les connaissances sur les possibles impacts de ces politiques, une revue de la littérature concernant les élasticités-prix croisées entre l'essence et les transports publics serait pertinente afin de valider l'argument selon lequel les deux biens sont des substituts, et si tel est le cas, quelle est l'ampleur de cette substituabilité.

Références

- [1] J. ALDY et al. « Economic Tools to Promote Transparency and Comparability in the Paris Agreement ». In : *Nature* 6 (2016), p. 1000-1004.
- [2] B. ANDERSON et al. « Uncertainty in Climate Change Modeling : Can Global Sensitivity Analysis Be of Help ? » In : *Risk Analysis* 34.2 (2014), p. 271-293.
- [3] D. ANTHOFF. *MimiFUND.jl*. 2019. URL : <https://github.com/fund-model/MimiFUND.jl/releases/tag/v3.9.0> (visité le 07/07/2019).
- [4] D. ANTHOFF, F. ERRICKSON et L. RENNELS. *MimiDICE2013.jl*. 2019. URL : <https://github.com/anthofflab/MimiDICE2013.jl> (visité le 01/07/2019).
- [5] D. ANTHOFF et R.S.J. TOL. *The Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution (FUND), Technical Description, Version 3.9*. 2014. URL : <http://www.fund-model.org/versions> (visité le 01/06/2019).
- [6] D. ANTHOFF et R.S.J. TOL. « The Uncertainty About the Social Cost of Carbon : a Decomposition Analysis Using FUND ». In : *Climatic Change* 117 (3 2013), p. 515-530.
- [7] D. ANTHOFF et al. « The Marginal Damage Costs of Different Greenhouse Gases : An Application of FUND ». In : *Economics : The Open-Access, Open-Assessment E-Journal* 8 (2014).
- [8] J. ASENSIO, A. GOMEZ-LOBO et A. MATAS. « How effective are policies to reduce gasoline consumption ? Evaluating a set of measures in Spain ». In : *Energy Economics* 42 (2014), p. 34-42.
- [9] BANK OF CANADA. *Gross Domestic Product : Implicit Price Deflator*. 2019. URL : <https://www.bankofcanada.ca/rates/exchange/annual-average-exchange-rates/> (visité le 05/10/2019).
- [10] C.P. BARROS et J. PRIETO-RODRIGUEZ. « A revenue-neutral tax reform to increase demand for public transport services ». In : *Transportation Research Part A* 42 (2008), p. 659-672.
- [11] W. BAUMOL. « On Taxation and the Control of Externalities ». In : *American Economic Association* 62.3 (1972), p. 307-322. URL : <https://www.jstor.org/stable/pdf/1803378.pdf?refreqid=excelsior%3Abdb2edde05cfa29d70363bc2ae721ebe> (visité le 25/08/2019).

- [12] L.M. BRANDER, Florax R.J.G.M. et J.E. VERMAAT. « The Empirics of Wetland Valuation : A Comprehensive Summary and a Meta-Analysis of the Literature ». In : *Environmental and Resource Economics* 33 (2 2006), p. 223-250.
- [13] M. BURKE, S. HSIANG et E. MIGUEL. « Global Non-Linear Effect of Temperature on Economic Production ». In : *Nature* 527 (2015), p. 235-239.
- [14] Ressources naturelles CANADA. *Le bon sens au volant*. 2014. URL : https://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oeef/pdf/transportation/fuel-efficient-technologies/autosmart_factsheet_6_f.pdf (visité le 24/08/2019).
- [15] D. CHANG et A. SERLETIS. « The demand for gasoline : evidence from household survey data ». In : *Journal of applied econometrics* 29 (2014), p. 291-313.
- [16] Environnement et CHANGEMENT CLIMATIQUE CANADA. *Technical Update to Environment and Climate Change Canada's Social Cost of Greenhouse Gas Estimates*. 2016. URL : http://publications.gc.ca/collections/collection_2016/eccc/En14-202-2016-eng.pdf (visité le 07/06/2019).
- [17] P. CHRISTENSEN, K. GILLINGHAM et W. NORDHAUS. « Uncertainty in Forecasts of Long-Run Economic Growth ». In : *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115.21 (2018), p. 5409-5414.
- [18] W.R. CLINE. *The Economics of Global Warming*. Washington, D.C. : Institute for International Economics, 1992.
- [19] P.M. COX, C. HUNTINGFORD et M.S. WILLIAMSON. « Emergent Constraint on Equilibrium Climate Sensitivity from Global Temperature Variability ». In : *Nature* 553 (2018), p. 319-322.
- [20] A. DEATON et J. MUELLBAUER. « An Almost Ideal Demand System ». In : *The American Economic Review* 70.3 (1980), p. 312-326.
- [21] K. DEB et M. FILIPPINI. « Public Bus Transport Demand Elasticities in India ». In : *Journal of Transport Economics and Policy* 47.3 (2013), p. 419-436.
- [22] R. DELLINK et al. « Long-Term Economic Growth Projections in the Shared Socioeconomic Pathways ». In : *Global Environmental Change* 42 (2017), p. 200-214.
- [23] T.E DOWNING, R. GREENER et N. EYRE. *The Economic Impacts of Climate Change : Assessment of Fossil Fuel Cycles for the ExternE Project*. Environmental Change Unit, University of Oxford et Eyre Energy Environment. 1996.

- [24] T.E DOWNING et al. *Full Fuel Cycle Study : Evaluation of the Global Warming Externality for Fossil Fuel Cycles with and without CO2 Abatement and for Two Reference Scenarios*. Environmental Change Unit. Oxford : University of Oxford, 1996.
- [25] M. DRUPP et al. *Discounting Disentangled : An Expert Survey on the Determinants of the Long-Term Social Discount Rate. Working Paper No. 195*. Document de travail. Centre for Climate Change Economics et Policy, 2015.
- [26] FEDERAL RESERVE BANK OF ST. LOUIS. *GDP Implicit Price Deflator in Canada*. 2019. URL : <https://fred.stlouisfed.org/series/CANGDPDEFQISMEI> (visité le 05/10/2019).
- [27] FEDERAL RESERVE BANK OF ST. LOUIS. *Gross Domestic Product : Implicit Price Deflator*. 2019. URL : <https://fred.stlouisfed.org/series/GDPDEF> (visité le 05/10/2019).
- [28] P. FORSTER et al. « Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing ». In : *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis - Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Sous la dir. de S. SOLOMON et al. Cambridge : Cambridge University Press, 2007, p. 129-234.
- [29] S. GIGLIO, M. MAGGIORI et J. STROEBEL. « Very Long-Run Discount Rates ». In : *The Quarterly Journal of Economics* 130 (1 2015).
- [30] K. GILLINGHAM et al. *Modeling Uncertainty in Integrated Assessment of Climate Change : A Multi-Model Comparison. NBER Working Paper No. 21637*. Document de travail. National Bureau of Economic Research, 2015.
- [31] C. GOLLIER. *Pricing the Future : The Economics of Discounting and Sustainable Development*. Princeton University Press, 2011, p. 6-34. 210 p. URL : http://idei.fr/sites/default/files/medias/doc/by/gollier/pricing_future.pdf (visité le 18/07/2019).
- [32] L.H. GOULDER et K. MATHAI. « Optimal CO2 Abatement in the Presence of Induced Technological Change ». In : *Journal of Environmental Economics and Management* 39 (1 2000), p. 1-38.
- [33] L.H. GOULDER et S.H. SCHNEIDER. « Induced Technological Change and the Attractiveness of CO2 abatement policies ». In : *Resource and Energy Economics* 21 (3-4 1999), p. 211-253.

- [34] Y. GUILLEMETTE et D. TURNER. *The Long View : Scenarios for the World Economy to 2060*. The Organisation for Economic Co-operation et Development, 2018.
- [35] J.K. HAMMITT, R.J. LEMPERT et M.E. SCHLESINGER. « A Sequential-Decision Strategy for Abating Climate Change ». In : *Nature* 357 (1992), p. 315-318.
- [36] C.W. HOPE. « Critical Issues for the Calculation of the Social Cost of CO₂ : why the estimates from PAGE09 are higher than those from PAGE2002 ». In : *Climatic Change* 117 (3 2013), p. 531-543.
- [37] C.W. HOPE. *The PAGE09 Integrated Assessment Model : A Technical Description*. University of Cambridge Judge Business School. Cambridge, 2011.
- [38] R.E. JUST, D.L. HUETH et A. SCHMITZ. *The Welfare Economics of Public Policy : A Practical Approach to Project and Policy Evaluation*. Cheltenham, UK : Edward Elgar Publishing Ltd, 2004, p. 573-574. 707 p.
- [39] MCKINSEY & COMPANY. *Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve*. US Environmental Protection Agency, 2009.
- [40] E. MEIER-REIMER et K. HASSELMANN. « Transport and Storage of CO₂ in the Ocean - An Inorganic Ocean-Circulation Carbon Cycle Model ». In : *Climate Dynamics* 2 (2 1987), p. 63-90.
- [41] R. MENDELSON, M. SCHLESINGER et L. WILLIAMS. « Comparing Impacts Across Climate Models ». In : *Integrated Assessment* 1.1 (2000), p. 37-48.
- [42] S. NAVRUD. « Valuing Health Impacts from Air Pollution in Europe ». In : *Environmental and Resource Economics* 20 (4 2001), p. 305-329.
- [43] W. NICHOLSON et C. SNYDER. *Microeconomic Theory : Basic Principles and Extensions*. 11^e éd. Mason, Ohio : South-Western/Cengage Learning, 2012. Chap. 19, p. 685-686. 758 p.
- [44] C.J. NICOL. « Elasticities of demand for gasoline in Canada and the United States ». In : *Energy Economics* 25 (2003), p. 201-214.
- [45] W. NORDHAUS. « A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change ». In : *Journal of Economic Literature* 45.3 (2007), p. 686-702.
- [46] W. NORDHAUS. « Climate Change : The Ultimate Challenge for Economics ». In : *American Economic Review* 109.6 (2019), p. 1991-2014.

- [47] W. NORDHAUS. *DICE-2016R September 2016*. 2016. URL : <http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/homepage/DICE2016R-091916ap.gms> (visité le 01/09/2019).
- [48] W. NORDHAUS. *DICE2016R-090916ap-v2*. 2016. URL : <http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/homepage/DICE2016R-090916ap-v2.xlsm>.
- [49] W. NORDHAUS. *DICE2016R-0919ap*. 2016. URL : <http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/homepage/DICE2016R-091916ap.gms>.
- [50] W. NORDHAUS. « Estimates of the Social Cost of Carbon : Concepts and Results from the DICE-2013R Model and Alternative Approaches ». In : *Journal of the Association of Environmental and Resource Economics* 1 (1 2014), p. 273-312.
- [51] W. NORDHAUS. « Evolution of Modeling of the Economics of Global Warming : Changes in the DICE Model ». In : *Climatic Change* 148.4 (2018), p. 623-640.
- [52] W. NORDHAUS. « Projections and Uncertainties about Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies ». In : *American Economic Review* 10.3 (2018), p. 333-360.
- [53] W. NORDHAUS. « Revisiting the Social Cost of Carbon ». In : *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 114.7 (2017), p. 1518-1523.
- [54] W. NORDHAUS et P. SZTORC. *DICE 2013R Introduction and User's Manual*. 2^e éd. 2013. URL : http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/homepage/documents/DICE_Manual_100413r1.pdf (visité le 28/05/2019).
- [55] R. OLSON et al. « A Climate Sensitivity Estimate Using Bayesian Fusion of Instrumental Observations and an Earth System Model ». In : *Journal of Geophysical Research* 117 (D4 2012).
- [56] A. PAVLOV. *MimiDICE2016.jl*. 2019. URL : <https://github.com/AlexandrePavlov/MimiDICE2016.jl> (visité le 19/08/2019).
- [57] D.W. PEARCE et D. MORAN. *The Economic Value of Biodiversity*. EarthScan, 1994.
- [58] J. PEREZ-GARCIA et al. « Economic Impacts of Climate Change on the Global Forest Sector : An Integrated Ecological/Economic Assessment ». In : *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 27 (1997), p. 123-138.
- [59] A. PIGOU. *The Economics of Welfare*. 4^e éd. .partie 2. Londres : MacMillan & Co. Ltd, 1932. Chap. 2, p. 131-135. 837 p. URL : http://files.libertyfund.org/files/1410/0316_Bk.pdf (visité le 25/08/2019).

- [60] A. PIGOU. *The Economics of Welfare*. 4^e éd. .partie 2. Londres : MacMillan & Co. Ltd, 1932. Chap. 9, p. 172-194. 837 p. URL : http://files.libertyfund.org/files/1410/0316_Bk.pdf (visité le 25/08/2019).
- [61] V. RAMASWAMY et al. « Radiative Forcing of Climate Change ». In : *Climate Change 2001 : The Scientific Basis - Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Sous la dir. de J.T. HOUGHTON et Y. DING. Cambridge : Cambridge University Press, 2001, p. 349-416.
- [62] K. RIAHI et al. « The Shared Socioeconomic Pathways and their Energy, Land Use, and Greenhouse Gas Emissions Implications : An Overview ». In : *Global Environmental Change* 42 (2017), p. 153-168.
- [63] G.H. ROE et M.B. BAKER. « Why Is Climate Sensitivity So Unpredictable ». In : *Science* 318 (2007), p. 629-318.
- [64] E.S. RUBIN et al. « A Review of Learning Rates for Electricity Supply Technologies ». In : *Energy Policy* 86 (2015), p. 198-218.
- [65] G. de RUS. « Public Transport Demand Elasticities in Spain ». In : *Journal of Transport Economics and Policy* 24.2 (1990), p. 189-201.
- [66] K.C. SAMIR et W. LUTZ. « The Human Core of the Shared Socioeconomic Pathways : Population Scenarios by Age, Sex and Level of Education for All Countries to 2100 ». In : *Global Environmental Change* 42 (2017), p. 181-182.
- [67] Interagency Working Group on SOCIAL COST OF CARBON. *Technical Support Document : Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866*. 2010. URL : https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/scc_tsd_2010.pdf (visité le 07/06/2019).
- [68] B.L. SOHNGEN, R.O. MENDELSON et R.A. SEDJO. « A Global Model of Climate Change Impacts on Timber Market ». In : *Journal of Agricultural and Resource Economics* 26 (2 2001), p. 326-343.
- [69] N. STERN. *Stern Review : The Economics of Climate Change*. Government of the United Kingdom, 2006.
- [70] THE SOCIETY, ENVIRONMENT AND ECONOMICS LAB. *PAGE-ICE*. 2019. URL : <https://github.com/openmodels/PAGE-ICE> (visité le 08/10/2019).

- [71] THE UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT. *UNCTAD-STAT*. 2019. URL : https://unctadstat.unctad.org/wds/ReportFolders/reportFolders.aspx?sCS_ChosenLang=en (visité le 05/08/2019).
- [72] THE UNITED NATIONS DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS. *World Population Prospects 2019*. 2019. URL : [https://population.un.org/wpp/Download/Files/1_Indicators%20\(Standard\)/EXCEL_FILES/1_Population/WPP2019_POP_F01_1_TOTAL_POPULATION_BOTH_SEXES.xlsx](https://population.un.org/wpp/Download/Files/1_Indicators%20(Standard)/EXCEL_FILES/1_Population/WPP2019_POP_F01_1_TOTAL_POPULATION_BOTH_SEXES.xlsx) (visité le 29/07/2019).
- [73] R.S.J. TOL. « Estimates of the Damage Costs of Climate Change - Part I : Benchmark Estimates ». In : *Environmental and Resource Economics* 21 (1 2002).
- [74] R.S.J. TOL. « Estimates of the Damage Costs of Climate Change - Part II : Dynamic Estimates ». In : *Environmental and Resource Economics* 21 (1 2002), p. 135-160.
- [75] H. TOYA et M. SKIDMORE. « Economic Development and the Impacts of Natural Disasters ». In : *Economics Letters* 94 (1 2007), p. 20-25.
- [76] C.-H. TSAI et C. MULLEY. « Identifying Short-Run and Long-Run Public Transport Demand Elasticities in Sydney : A Pseudo Panel Approach ». In : *Journal of Transport Economics and Policy* 48.2 (2014), p. 241-259.
- [77] M.L. WEITZMAN. « Gamma Discounting ». In : *American Economic Review* 91.1 (2001), p. 260-271.
- [78] M.L. WEITZMAN. « On Diversity ». In : *The Quarterly Journal of Economics* 107 (2 1992), p. 363-405.
- [79] M.L. WEITZMAN. « The Noah's Ark Problem ». In : *Econometrica* 66.6 (1998), p. 1279-1298.
- [80] M.L. WEITZMAN. « What to Preserve? An Application of Diversity Theory to Crane Conservation ». In : *The Quarterly Journal of Economics* 108.1 (1993), p. 157-183.
- [81] WORLD BANK. *World Development Indicators*. 2019. URL : <https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=2&series=PA.NUS.FCRF&country=> (visité le 05/08/2019).
- [82] D. YUMASHEV. *PAGE-ICE IAM, v6.22 Technical Description*. Version 6.22. The Pentland Centre for Sustainability in Business. Lancaster, 2019.