Atteindre 100 % de ventes de véhicules zéro émission d'ici 2035 au Canada : options politiques

Rapport d'analyse et de recherche

Janvier 2022

Préparé pour Équiterre et la Fondation David Suzuki par

Sustainable Transportation Action Research Team (START)

Jonn Axsen, *Directeur*

Chandan Bhardwaj, *Chercheur*

Équiterre

DAVID SUZUKI FOUNDATION
One nature.

Collaborateur(trice)s

Contributions
Andréanne Brazeau, Analyste politique – Mobilité durable | Équiterre
Tom Green, Analyste principal des politiques climatiques | Fondation David Suzuki

Révision et mise en forme
Ian Hanington, Éditeur | Fondation David Suzuki
Loujain Kurdi, Chargée de communications | Équiterre
Marianne Legault, Graphiste | Équiterre

Traduction
Alexandra Marquis

© Équiterre et Fondation David Suzuki

ISBN numérique :

Produit par la BANQ

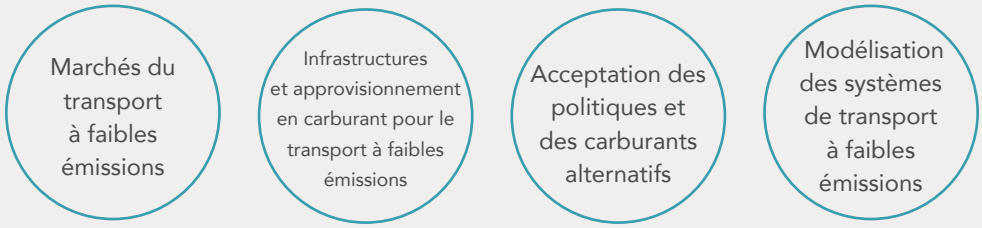
Note au lectorat

Les graphiques présentés dans le rapport sont seulement disponibles en anglais. Le tableau ci-dessous propose une traduction des termes utilisés dans ces graphiques.

Termes dans les figures	Expression complète	Traduction
Target	*Zero-emission vehicle sales target*	Cible de ventes de véhicules zéro émission
GHG Target	*Greenhouse gas (GHG) emissions reduction target*	Cible de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES)
VES	*Vehicle emission standards*	Normes d'émissions de GES des véhicules renforcées
ZEV (neutral) ou ZEV	*Neutral ZEV mandate*	Norme VZE neutre
Baseline	*Baseline scenario*	Scénario de référence
Feebate	*Feebate system*	Système de redevance-remise
+BEV-only ou BEV	*ZEV mandate limited to battery-electric vehicles starting in electric*	Norme VZE qui inclut seulement les véhicules électriques à batterie à partir de 2030
+PHEV-limited	*ZEV mandate that caps plug-in hybrid vehicles to 50% starting in 2030*	Norme VZE qui limite l'admissibilité des véhicules hybrides rechargeables à 50 % à partir de 2030

À propos de la *Sustainable Transportation Action Research Team* (START)

La *Sustainable Transportation Action Research Team* (START) adopte une approche interdisciplinaire à l'égard des solutions de transport à faibles émissions de carbone, en intégrant les apprentissages pertinents tirés de méthodes de recherche quantitatives et qualitatives, comme les analyses statistiques, la modélisation de l'économie énergétique, les sondages auprès des consommateur(trice)s et des citoyen(ne)s et les entrevues auprès de parties prenantes et les analyses des médias et des politiques. Les recherches de START portent actuellement sur quatre grands thèmes:



À propos d'Équiterre

Équiterre travaille à rendre tangibles, accessibles et inspirantes les transitions vers une société écologique et juste. Fortement préoccupé par le phénomène des changements climatiques, l'organisme a développé une expertise importante en matière de politiques publiques visant la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). À travers des projets de démonstration, d'éducation, de sensibilisation, de recherche, d'accompagnement et de mobilisation, Équiterre rassemble des citoyen(ne)s, des groupes sociaux, des entreprises, des organisations publiques, des municipalités, des chercheur(euse)s et des élu(e)s dans les domaines de l'alimentation, du transport, du commerce équitable, de l'énergie durable, de la consommation et de la lutte aux changements climatiques. Équiterre compte 25 000 membres et plus de 130 000 sympathisant(e) s qui participent à ses actions. L'organisme, qui a fêté ses 25 années d'existence en 2018, est l'un des principaux organismes environnementaux de la province de Québec.

À propos de la Fondation David Suzuki

Établie en 1990, la Fondation David Suzuki est un organisme sans but lucratif pancanadien et bilingue. Son siège social est à Vancouver et compte des bureaux à Montréal et Toronto. La Fondation a pour mission de protéger l'environnement et notre qualité de vie, maintenant et pour l'avenir. Le travail de la Fondation contribue à résoudre la crise climatique et la disparition massive des espèces en mettant l'accent sur trois volets essentiels : zéro émission de carbone, nature florissante et collectivités durables. Par la science, la sensibilisation, l'analyse de politiques et l'engagement du public, et des partenariats avec les entreprises, les gouvernements et les acteurs de la société civile, la Fondation œuvre à définir et à mettre en place des solutions permettant de vivre en équilibre avec la nature. La Fondation David Suzuki compte sur l'appui de plus de 300 000 sympathisants à travers le Canada, dont près de 100 000 au Québec.

Préambule

Les Canadiennes et les Canadiens prennent peu à peu conscience du fait que le pays fait face à un défi de taille en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre (GES) provenant des véhicules. Nous aimons conduire de gros modèles; la plupart des nouveaux véhicules achetés appartiennent aux catégories des véhicules utilitaires sport (VUS) et des camionnettes. Nous sommes dans la position peu enviable de posséder le parc de véhicules personnels le plus polluant au monde. Malgré les normes d'émissions de GES en vigueur, la tarification du carbone et les investissements à l'échelle municipale visant à offrir davantage d'options de transport en commun et de transport actif, les émissions de GES attribuables au secteur des transports continuent d'augmenter — sans compter que l'atteindre des objectifs de ventes de véhicules zéro émission (VZE) du gouvernement fédéral demeure peu probable.

Le Canada dispose heureusement d'un réseau électrique dont les émissions sont presque nulles, et la Norme d'électricité propre à venir permettra d'accélérer la substitution de la production d'énergies fossiles par celle d'énergies renouvelables. Dans le secteur des transports, abandonner l'achat de véhicules alimentés par des combustibles fossiles polluants comme l'essence et le diesel au profit de véhicules propulsés par de l'électricité propre est donc une solution cruciale pour réduire les émissions de GES du Canada.

Pourtant, peu de VZE — voire aucun — sont prêts à quitter la cour des concessionnaires automobiles pour bon nombre de Canadiennes et de Canadiens, et c'est particulièrement vrai à l'extérieur des deux provinces dotées d'une norme VZE, le Québec et la Colombie-Britannique. De toute évidence, le Canada a un grave problème d'approvisionnement en matière de VZE : une récente étude commandée par Transports Canada révèle que 64 % des concessionnaires canadiens ont déclaré que la clientèle désireuse de se procurer un VZE devrait attendre entre trois et six mois avant de pouvoir prendre possession de leur achat.[1] À l'opposé, la disponibilité immédiate de véhicules à moteur à combustion interne (MCI) et la publicité omniprésente encourageant l'achat de VUS font tache. La même enquête a aussi mis en lumière certaines inégalités régionales, le Québec et la Colombie-Britannique ayant accès à plus de modèles grâce aux normes VZE provinciales, tandis que dans certaines provinces, apercevoir un VZE sur le terrain d'un concessionnaire est chose rare. De même, les acheteurs et acheteuses en Chine, dans l'Union européenne et même aux États-Unis peuvent choisir parmi une plus grande variété de modèles de VZE. Au Canada, les constructeurs automobiles sont réticents à l'idée de renoncer aux profits réalisés en vendant des véhicules qui, pourtant, aggravent les changements climatiques, polluent nos collectivités et entraînent des répercussions majeures sur la santé.

En appui aux engagements du gouvernement fédéral à l'égard des VZE et des cibles climatiques, Équiterre et la Fondation David Suzuki ont confié à Jonn Axsen et à Chandan Bhardwaj, de la Sustainable Transportation Action Research Team (START) de l'Université Simon Fraser, la tâche de modéliser différentes politiques permettant d'atteindre l'objectif de 100 % de ventes de VZE d'ici 2035 au Canada et de réduire les émissions de GES du secteur des transports. C'est en raison de leur expertise et de leur capacité à modéliser à la fois le côté de la consommation et celui de la production du marché des véhicules neufs que nous avons sollicité les services de START. Son modèle décrit des représentations réalistes du comportement des consommateurs et consommatrices à la recherche d'un nouveau véhicule. Il comprend également le point de vue du secteur automobile, dont les décisions des fabricants concernant les VZE dans le contexte de politiques climatiques qui comprennent la hausse du nombre de modèles de VZE disponibles, les investissements dans la recherche et le développement (R&D) en vue de réduire les coûts à venir des VZE et l'augmentation du prix des modèles de véhicules à MCI pour subventionner le prix des modèles de VZE et augmenter leurs revenus de ventes. Le cadre de modélisation de START permet d'explorer différents arrangements, en évaluant entre autres les émissions de GES ainsi que les coûts et les profits du secteur automobile. Nous avons aussi demandé aux auteurs d'évaluer les répercussions des politiques préférant les véhicules électriques à batterie (VEB) aux véhicules hybrides rechargeables (VHR), puisque ces derniers continueront de consommer des combustibles fossiles, entraînant plus d'émissions de GES dans le futur.

1 Dunsky Energy + Climate. Zero Emission Vehicle Availability Estimating Inventories in Canada: 2020/2021 Update. (2021).

Dans le cadre de leur analyse, Jonn Axsen et Chandan Bhardwaj calculent la rentabilité des diverses options de réglementation visant à atteindre les objectifs du Canada en matière de VZE. Ils examinent également les impacts de ces politiques sur les bénéfices des fabricants automobiles ainsi que l'évolution du surplus de consommation. La prudence reste de mise dans l'interprétation de ces mesures : la portée du projet étant limitée, les auteurs n'ont pas inclus dans leur évaluation la valeur des co-bénéfices sur la santé et le climat pouvant être obtenus par la réduction des émissions. La preuve est maintenant faite : les véhicules munis de tuyaux d'échappement nuisent à la santé humaine en raison de l'émission des sous-produits de l'utilisation de combustibles fossiles, comme le dioxyde d'azote et l'ozone troposphérique.[2] Par exemple, une étude récente a révélé qu'en transformant 100 % du parc de véhicules personnels empruntant le corridor routier de la 401 passant par Toronto en un parc de VZE, on pourrait éviter des coûts sanitaires annuels de 192 millions de dollars.[3] Si la portée de l'étude était élargie afin d'inclure ces frais, les avantages de la transition vers les VZE seraient d'autant plus évidents et les coûts d'atténuation seraient encore plus faibles dans chaque scénario de politiques.

Les résultats de la modélisation et de l'analyse démontrent clairement deux choses. Premièrement, malgré les balbutiements d'intensification de production de VZE et d'investissements dans la fabrication de VZE affichés par l'industrie automobile, les politiques existantes, les investissements dans les infrastructures de recharge, les efforts volontaires de l'industrie, les changements technologiques et l'évolution des préférences des consommateurs et consommatrices, ne feront pas le poids. À peine 38 % des véhicules neufs vendus en 2035 seraient des VZE. Ces faits impliquent que le Canada manquerait sans doute à ses engagements climatiques. Ils signifient également plus de pollution atmosphérique locale, puisque chaque véhicule à essence additionnel vendu entre aujourd'hui et 2035 aura des répercussions sur les émissions de GES et la santé pendant au moins une décennie supplémentaire. Il est donc essentiel d'adopter des politiques ambitieuses et de prévoir des sanctions sévères en cas de non-conformité. Deuxièmement, le Canada dispose d'un éventail d'options abordables—et permettant au secteur automobile de prospérer—pour atteindre ses cibles de ventes de VZE de 2025, de 2030 et de 2035, mais il se doit d'intervenir rapidement.

Le gouvernement fédéral subit beaucoup de pression de la part des constructeurs automobiles, dont la principale activité demeure la vente de véhicules à essence. Ce rapport démontre que de continuer à s'appuyer sur les politiques existantes et sur les mesures volontaires de l'industrie ferait en sorte de laisser le Canada loin derrière les autres économies développées. À travers tout le pays, les individus à la recherche d'un nouveau véhicule doivent pouvoir s'en procurer un parmi les modèles qui utilisent des technologies du XXIe siècle, qui protègent la qualité de l'air et qui n'aggravent pas le réchauffement de la planète.

En publiant cette étude, Équiterre et la Fondation David Suzuki sont sensibles au fait que les VZE ne permettent pas de répondre aux enjeux de congestion et de sécurité qui accablent les villes et les routes canadiennes. Bien que nous croyions que les VZE sont préférables aux véhicules alimentés par des carburants fossiles, nous recommandons vivement d'accorder une place plus importante aux alternatives de mobilité durable en améliorant le transport collectif, en élargissant les réseaux de transport actif ainsi qu'en créant des collectivités complètes qui réduisent la dépendance à l'automobile et fortifient la santé publique..

Andréanne Brazeau | Analyste politique – Mobilité durable, Équiterre

Tom Green | Analyste principal des politiques climatiques, Fondation David Suzuki

2 Burnett, R. T., Cakmak, S. et Brook, J. R. (1998). The Effect of the Urban Ambient Air Pollution Mix on Daily Mortality Rates in 11 Canadian Cities. *Canadian Journal of Public Health*, 89(3), 152–156. https://doi.org/10.1007/BF03404464.

3 Shamsi, H., Munshed, M., Tran, M.-K., Lee, Y., Walker, S., The, J., Raahemifar, K. et Fowler, M. (2021). Health Cost Estimation of Traffic-Related Air Pollution and Assessing the Pollution Reduction Potential of Zero-Emission Vehicles in Toronto, Canada. *Energies*, 14(16). https://doi.org/10.3390/en14164956.

Table des matières

Liste des abréviations, des acronymes et des symboles 7

Liste des tableaux et figures 8

Préambule 10

1. Introduction 13

2. Objectifs de recherche 14

3. Modèle AUtomaker-Consumer (AUM) 15

4. Scénarios de politique 28

5. Resultats 31

6. Summaire des principales conclusions 48

7. Répercussions politiques 49

8. Références 50

9. Annexe : processus de validation 52

Liste des abréviations, des acronymes et des symboles

$	Dollars canadiens
$/tonne	Rentabilité en dollars canadiens par tonne de CO_2 évitée
A	Autonomie du ou des véhicule(s)
AR	Accès à la recharge
ASC	*Alternative Specific Constant*
AUM	*AUtomaker-consumer Model*
C.-B.	Colombie-Britannique
CC	Capacité cumulative
CO_2	Dioxyde de carbone
CO_2e	Équivalent de CO_2
CPEVS	*Canadian Plug-in Electric Vehicle Study*
CZEVS	*Canadian Zero Emissions Vehicle Study*
g	Grammes
gCO_2	Grammes de CO_2
gCO_2e	Grammes d'équivalent CO_2
GES	Gaz à effet de serre
g/MJ	Intensité carbone en grammes par mégajoules
IEA	*International Energy Agency*
km	Kilomètres
kWh	Kilowattheure
L	Litre(s)
LCFS	*Low-carbon fuel standard*
MCI	Moteur à combustion interne
MJ	Mégajoule(s)
MT	Mégatonne(s)
NCP	Norme sur les carburants propres
PM	Part de marché
R&D	Recherche et développement
SC	Surplus de consommation
START	*Sustainable Transportation Action Research Team*
VC	Véhicule(s) conventionnel(s)
VDP	Volonté de payer
VEB	Véhicule(s) électrique(s) à batterie
VER	Véhicule(s) électrique(s) rechargeable(s)
VHR	Véhicule(s) hybride(s) rechargeable(s)
VKP	Véhicule(s)-kilomètre(s) parcouru(s)
VM	Variété de modèles
VUS	Véhicule(s) utilitaire(s) sport
VZE	Véhicule(s) zéro émission

Liste des figures et des tableaux

Figures

Figure ES1. Part de marché des VZE dans les ventes de véhicules neufs (politiques individuelles, cas médian) ..11

Figure ES2. Émissions de GES des véhicules légers (stratégie neutre concernant les VZE plus mélanges de politiques, fourchette d'incertitude comprenant des paramètres pessimistes et optimistes). 11

Figure ES3. Comparaison de la rentabilité des politiques (en $/tonne) d'ici 2035 en ce qui concerne la réduction des émissions de GES (scénario médian, taux d'actualisation de 8 %).....11

Figure 1. Structure du modèle d'adoption de la technologie du modèle *AUM* 15

Figure 2. Niveaux des choix de consommation dans le modèle AUM 16

Figure 3.Analyse de sensibilité (part de marché des VZE en 2035, « Référence + Système de redevance-remise ») 33

Figure 4. Part de marché pour les VZE dans les ventes de véhicules neufs (politiques individuelles, cas médian)... 34

Figure 5. Part de marché pour les VZE dans les ventes de véhicules neufs (politiques individuelles, fourchette d'incertitude).....35

Figure 6. Pourcentage de VEB vendus dans les ventes totales de VZE pour chaque année de vente (politiques individuelles, fourchette d'incertitude) 36

Figure 7. Émissions de GES émis par les véhicules légers (politiques individuelles, fourchette d'incertitude) 36

Figure 8. Part de marché de VZE dans les ventes de véhicules neufs (variations des normes VZE, cas médian) ..37

Figure 9. Part de marché pour les VZE dans les ventes de véhicules neufs (normes VZE, fourchette d'incertitude) 37

Figure 10. Pourcentage de VEB vendus dans les ventes totales de VZE pour chaque année de vente (variations des normes VZE, fourchette d'incertitude) 38

Figure 11. Réduction des émissions de GES des véhicules légers (variations de la norme VZE, fourchette d'incertitude).....39

Figure 12. Part de marché de VZE dans les ventes de véhicules neufs (combinaisons de politiques avec norme VZE neutre, cas médian).....39

Figure 13. Part de marché des VZE dans les ventes de véhicules neufs (combinaison de politiques avec une norme VZE neutre, fourchette d'incertitude).....40

Figure 14. Pourcentage de VEB vendus parmi les ventes totales de VZE neufs pour chaque année de vente (combinaison de politiques avec norme VZE neutre, fourchette d'incertitude).....40

Figure 15. Réduction des émissions de GES provenant des véhicules légers (combinaison de politiques avec norme VZE neutre, fourchette d'incertitude).....41

Figure 16. Part de marché de VZE dans les ventes de véhicules neufs (combinaisons de politiques avec norme VZE limitée aux VEB, cas médian).....41

Figure 17. Part de marché pour les VZE dans les ventes de véhicules neufs (combinaison de politiques avec norme VZE limitée aux VEB, fourchette d'incertitude) 42

Figure 18. Pourcentage de VEB vendus parmi les ventes totales de VZE pour chaque année de vente (combinaison de politiques avec norme VZE limitée aux VEB, fourchette d'incertitude) 42

Figure 19. Réduction des émissions de GES provenant des véhicules légers (combinaison de politiques avec norme VZE limitée aux VEB, fourchette d'incertitude) 43

Figure 20. CComparaison de la rentabilité des politiques (en $/tonne) d'ici 2035 en matière de réduction des émissions de GES (scénario médian, taux d'actualisation de 8 %)..... 46

Figure 21. Coûts totaux de chaque scénario (2020-2035, taux d'actualisation de 8 %) 47

Figure 22. Total des dépenses gouvernementales (non actualisées) dans le scénario de référence et dans le avec le programme de redevance-remise seulement 48

Tableaux

Tableau 1. Liste des attributs et des valeurs correspondantes estimées de la volonté de payer (VDP) de leurs coefficients 18

Tableau 2. Valeurs optimistes, médianes et pessimistes pour les paramètres clés du modèle..... 21

Tableau 3. Paramètres exogènes utilisés dans le modèle du constructeur automobile..... 23

Tableau 4. Hypothèses relatives à l'intensité énergétique et à l'intensité des émissions de carbone dans le carburant des véhicules au Canada (illustrées seulement pour la catégorie des véhicules automobiles compacts) 26

Tableau 5. Subventions de base pour les VEB 30

Tableau 6. Subventions de base pour les VHR..... 30

Tableau 7. Structure des subventions et des redevances concernant le système de redevance-remise (pratiquement autofinancé)..... 32

Tableau 8. Sommaire des scénarios, y compris les coûts liés à la politique (2035, scénario médian) 44

Sommaire

Contexte

Des politiques rigoureuses sont nécessaires pour atteindre les objectifs du Canada de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) de 40 à 45 % d'ici 2030 par rapport aux niveaux de 2005 et d'atteindre la carboneutralité d'ici 2050.[4] À l'été 2021, le gouvernement fédéral s'est fixé comme objectif d'atteindre 100 % des ventes de véhicules zéro émission (VZE) d'ici 2035, avec une cible provisoire de 50 % d'ici 2030. Bien que l'objectif soit décrit comme étant une « cible obligatoire », on ne sait pas encore quels mécanismes politiques seront utilisés pour atteindre les cibles de 2030 ou celles de 2035. Pour assurer l'atteinte de cette cible selon laquelle la totalité des voitures vendues sera des VZE, il faudra presque certainement mettre en place une politique ou une combinaison de politiques plus rigoureuses que celles en vigueur actuellement.

Dans cette étude, nous explorons trois (3) voies pouvant permettre au Canada d'atteindre ses objectifs de ventes de VZE pour 2030 et 2035, soit l'adoption d'une norme VZE, le resserrement des normes d'émissions de GES des véhicules et un système de redevance-remise. Nous modélisons également trois variantes de la norme VZE et six combinaisons de cette politique avec des normes renforcées sur les émissions de GES des véhicules ou un système de redevance-remise. L'objectif est de comparer ces scénarios stratégiques en termes de ventes de VZE, de réduction des émissions de GES et de rentabilité, cette dernière étant mesurée en dollars par tonne ($/tonne) de CO_2 abattu, en tenant compte des répercussions sur les surplus de consommation et les profits des constructeurs automobiles.

Méthode

Nous utilisons le modèle AUtomaker-consumer Model (*AUM)* pour simuler les répercussions de ces politiques sur le secteur canadien des véhicules légers de 2020 à 2035. Ce modèle se distingue en ce sens qu'il simule les interactions entre des consommatrices et des consommateurs aux comportements réalistes et un agrégat de constructeur automobile cherchant à maximiser les profits. Les préférences de consommation s'établissent en fonction de données d'enquête empiriques recueillies auprès des acheteuses et acheteurs d'automobiles au Canada, et les préférences peuvent changer avec l'exposition accrue aux VZE. Le modèle *AUM* représente de façon endogène une prévision pluriannuelle pour un constructeur d'automobiles qui maximise les profits, y compris des décisions portant sur : i) l'augmentation de la variété des modèles de VZE, ii) les subventions à prix croisés attribuées à l'interne et iii) l'investissement dans la recherche et le développement dans le but de réduire les coûts futurs des VZE. Les paramètres sont tirés de la documentation, et le rendement du modèle est harmonisé avec les ventes actuelles et les prévisions d'autres modèles et études. Nous représentons l'incertitude en effectuant une analyse de l'incertitude avec des paramètres « optimistes » et « pessimistes » par rapport aux VZE.

Principales conclusions

Premièrement, nous constatons que les politiques actuelles (« de référence ») au Canada (en date de septembre 2021) sont loin d'être suffisantes pour atteindre les objectifs de vente de VZE en 2030 ou en 2035. Ces objectifs de vente peuvent être atteints (ou presque atteints) par les trois politiques énergétques que nous avons examinées ici, à savoir la norme VZE, les normes renforcées sur les émissions de GES des véhicules (normes d'émissions de GES des véhicules) et un système de redevance-remise (figure ES1).

Deuxièmement, nous constatons que les politiques de référence sont également en deçà des objectifs d'atténuation des émissions de GES pour 2030, même dans des conditions optimistes (figure E2). En revanche, tous les scénarios stratégiques explorés peuvent atteindre les objectifs de 2030 dans des conditions intermédiaires ou optimistes, avec des réductions encore plus importantes d'ici 2035. À titre d'exemple, la figure ES2 illustre les réductions des émissions de GES dans la référence avec la norme VZE neutre et plusieurs combinaisons alliant cette norme VZE neutre (+ Normes d'émissions de GES renforcées, + Système de redevance-remise et + Normes d'émissions de GES renforcées + Système de redevance-remise). En général, les réductions d'émissions de GES provenant d'un scénario intégrant certaines politiques sont plus importantes lorsque i) la politique en question favorise les véhicules électriques à batterie (VEB) par rapport aux véhicules hybrides rechargeables (VHR) et ii) d'autres politiques s'ajoutent à la combinaison.

4 Le Canada n'a pas adopté de cibles précises en matière de décarbonisation des véhicules légers. Aux fins de la présente analyse, il est supposé que l'objectif de réduction des émissions de GES pour 2030 est proportionnel pour ce secteur, soit une réduction d'au moins 40 % par rapport aux niveaux de 2005.

Figure ES1. Part de marché des VZE dans les ventes de véhicules neufs (politiques individuelles, cas médian)

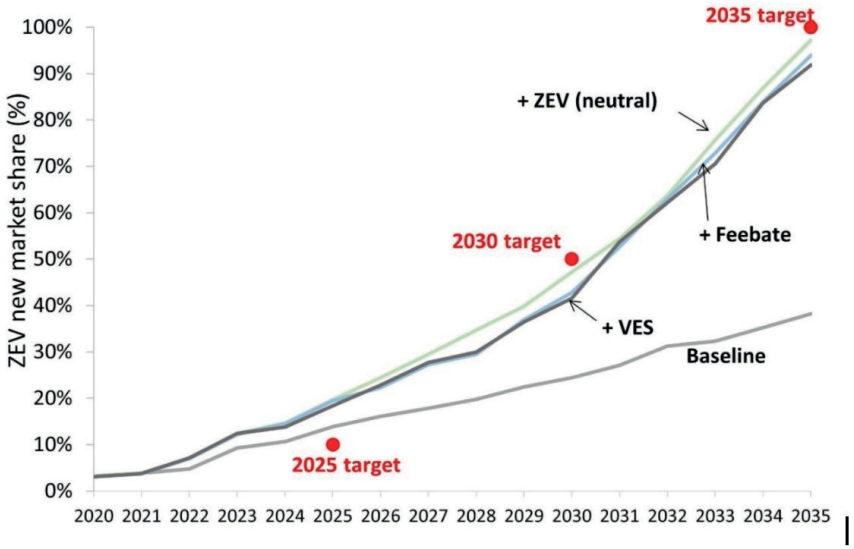
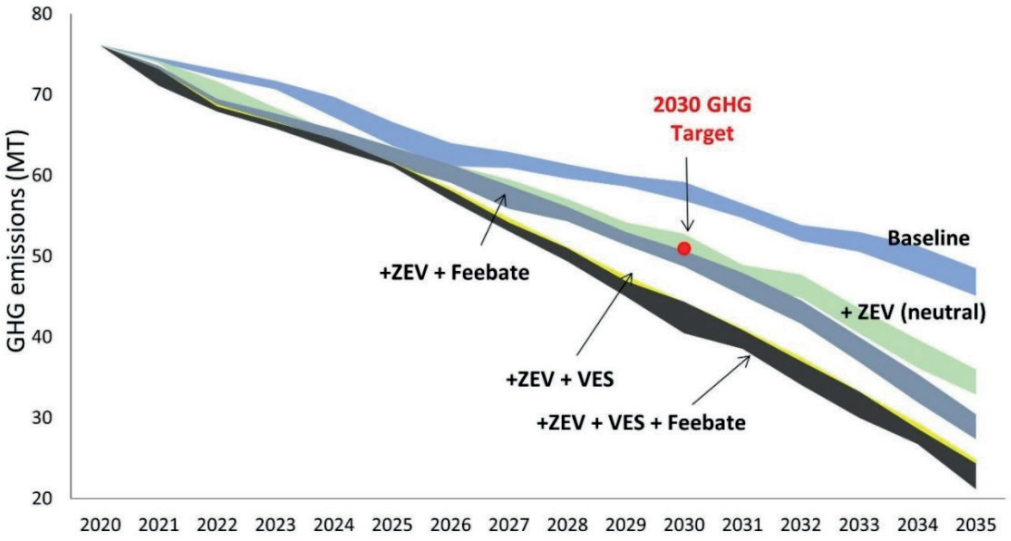


Figure ES2. Émissions de GES des véhicules légers (stratégie neutre concernant les VZE plus mélanges de politiques, fourchette d'incertitude comprenant des paramètres pessimistes et optimistes)



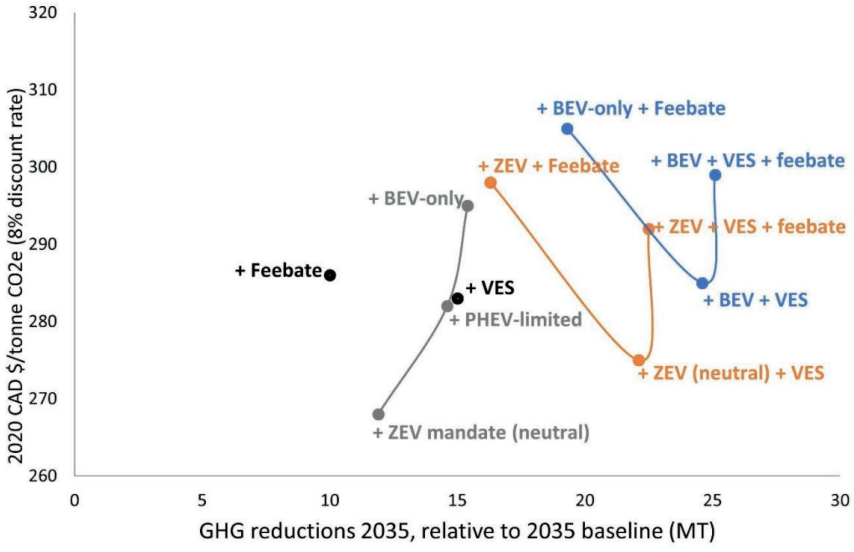
Remarque : Par souci de clarté, l'axe des Y est tronqué à 20 Mt.

Troisièmement, nous décrivons le rapport coût-efficacité de chaque scénario des politiques par rapport aux réductions de GES de 2035 selon le scénario de référence de la figure ES3. Voici ce que nous avons constaté :

1. La norme VZE neutre demeure **le moyen le plus rentable** d'atteindre l'objectif de vente de VZE pour 2035.
2. Associer une norme VZE et des normes d'émissions de GES renforcées constitue également une méthode **relativement peu coûteuse** (en conjonction avec d'autres réductions des émissions de GES).
3. LLes versions de la norme VZE obligeant la vente de davantage de VEB **permettent de réduire davantage les émissions de GES**, mais sont également **plus coûteuses.**
4. Le système de redevance-remise (seule ou combinée à d'autres politiques) est **plus coûteux** que les autres scénarios stratégiques.
5. En général, les scénarios stratégiques ont tendance à être **moins efficaces** ($/tonne plus élevé) lorsque :
   a. les options technologiques sont limitées (en particulier lorsqu'un plafond sur les ventes de VHR ou une interdiction de vente de VHR est en place) ;
   b. les options de conformité sont limitées (notamment la redevance-remise) ; ou
   c. lorsque les réductions globales des émissions de GES sont plus importantes.

Figure ES3. Comparaison de la rentabilité des politiques (en $/tonne) d'ici 2035 en ce qui concerne la réduction des émissions de GES (scénario médian, taux d'actualisation de 8 %)

Recommandations politiques



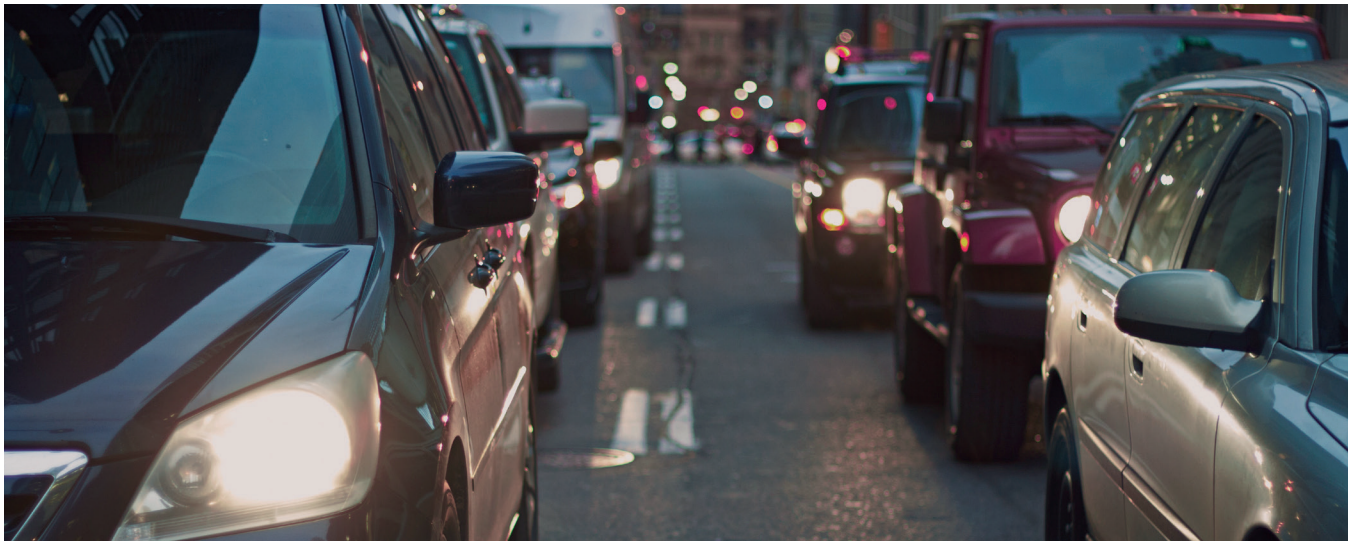
Le choix d'une combinaison idéale de politiques exige plusieurs compromis. Nous donnons ici un aperçu d'un sous-ensemble de critères d'évaluation des politiques, à savoir les répercussions sur les ventes de VZE, la réduction des GES, les coûts des politiques et l'incertitude des estimations futures. **Par rapport à un système de redevance-remise, nous estimons que la norme VZE ou les normes d'émissions de GES renforcées sont plus efficaces pour réduire les émissions de GES, en plus d'être plus rentables (avec une meilleure certitude). La combinaison d'une norme VZE et des normes d'émissions de GES renforcées pour les véhic**ules est particulièrement prometteuse. Avoir recours à des modèles de norme VZE qui favorisent les VEB peut introduire d'autres réductions des émissions de GES, mais à un coût plus élevé.

Les recherches futures devraient également tenir compte de l'acceptabilité politique de chaque mesure, ainsi que des répercussions possibles sur l'équité, qui n'ont pas fait l'objet d'études dans le présent cas. Nous reconnaissons également que nos calculs de rentabilité ne tiennent pas compte des avantages connexes pour la société, par exemple, la réduction de la pollution atmosphérique et sonore ainsi que les gains en matière de santé publique et de sécurité routière. L'inclusion de ces avantages connexes réduirait probablement les coûts associés à chacun des scénarios examinés ici, bien que nous nous attendions à ce que le classement relatif de ces derniers demeure le même.

1. Introduction

Le secteur des transports représentait environ 30 % des émissions de gaz à effet de serre au Canada en 2019.[5] Entre 2005 et 2019, les émissions de gaz à effet de serre (GES) dans le secteur des transports au Canada ont augmenté de 14 %, soit le secteur qui connaît la croissance la plus rapide selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, et de 18 % dans le seul secteur du transport routier.[6] Dans ce contexte, des politiques strictes sont nécessaires pour atteindre les objectifs du Canada concernant la réduction des émissions de 40 à 45 % d'ici 2030 (par rapport aux niveaux de 2005) et d'atteindre la carboneutralité d'ici 2050.[7]

Afin de soutenir l'atteinte de ces objectifs, à l'été 2021, le gouvernement national s'est fixé comme objectif d'atteindre 100 % des ventes de véhicules zéro émission (VZE) d'ici 2035, avec une cible provisoire de 50 % d'ici 2030.[8,9] Bien que l'objectif soit décrit comme étant une « cible obligatoire », on ne sait pas encore quels mécanismes politiques seront utilisés pour atteindre les cibles de 2030 ou celles de 2035. Les travaux de modélisation effectués par le secteur des véhicules légers au Canada indiquent qu'une politique plus rigoureuse est nécessaire pour faire passer les ventes de VZE à 30 % de part de marché en 2030, malgré la gamme de subventions, de mécanismes de prix et de règlements actuellement en place.[10,11] L'atteinte d'un objectif de 100 % de ventes de VZE nécessitera presque certainement l'ajout d'une politique ou d'une combinaison de politiques particulièrement plus ambitieuse(s).



5 Environment and Climate Change Canada. National Inventory Report 1990-2019: Greenhouse Gas Sources and Sinks in Canada, Canada's submission to the United Nations Framework Convention on Climate Change (2021).

6 *Ibid.*

7 Le Canada n'a pas adopté de cibles précises en matière de décarbonisation des véhicules légers. Aux fins de la présente analyse, il est supposé que l'objectif de réduction des émissions de GES pour 2030 est proportionnel pour ce secteur, soit une réduction d'au moins 40 % par rapport aux niveaux de 2005.

8 Gouvernement du Canada. (2021). Bâtir une économie verte : le gouvernement du Canada exigera que la totalité des voitures et camions légers à passagers vendus soit des véhicules zéro émission d'ici 2035. URL https://www.canada.ca/fr/transports-canada/nouvelles/2021/06/batir-une-economie-verte-le-gouvernement-du-canada-exigera-que-la-totalite-des-voitures-et-camions-legers-a-passagers-vendus-soit-des-vehicules-zer.html.

9 Dans le présent rapport, l'acronyme VZE inclut les véhicules hybrides rechargeables (VHR) et les véhicules électriques à batterie (VEB). Bien que, dans la plupart des définitions de politiques et programmes, les véhicules à pile à combustible hydrogène sont également considérés comme des VZE, cette technologie est exclue de l'expression «VZE» ici.

10 Axsen, J. & Wolinetz, M. Reaching 30% plug-in vehicle sales by 2030: Modeling incentive and sales mandate strategies in Canada. Transportation Research Part D: Transport and Environment 65, 596-617, doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.09.012 (2018).

11 Bhardwaj, C., Axsen, J. & McCollum, D. Simulating automakers' response to zero emissions vehicle regulation. Transportation Research Part D: Transport and Environment 94, 102789, doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102789 (2021).

Dans cette étude, trois politiques sont examinées pour que le Canada atteigne ses objectifs de vente de VZE pour 2030 et 2035. La première consiste en une obligation d'atteindre des cibles annuelles de vente de VZE, une politique appelée norme VZE, qui exige une part croissante de ventes de VZE par les constructeurs automobiles et impose des pénalités financières en cas de non-conformité (généralement de l'ordre de 5 000 $ à 10 000 $ par véhicule). Depuis son introduction en Californie en 1990, une norme VZE a également été mise en œuvre dans plusieurs autres États américains, ainsi qu'en Colombie-Britannique, au Québec et en Chine. Les normes VZE en Amérique du Nord sont actuellement mises à jour pour exiger des ventes de 100 % d'ici 2035, y compris les plans de moderniser les versions destinées à la Colombie-Britannique et au Québec. Nous explorons le potentiel de ces normes appliquées à l'échelle nationale avec une trajectoire d'exigences similaire.

Le renforcement des normes d'émissions de GES des véhicules, qui exigent que les constructeurs automobiles réduisent progressivement l'intensité moyenne des émissions de carbone (en g d'éq. CO_2/km) des véhicules qu'ils vendent au cours d'une année-modèle donnée, constitue la deuxième voie réglementaire. Ces normes sont plus neutres sur le plan technologique qu'une norme VZE, car les constructeurs automobiles peuvent s'y conformer en améliorant l'efficacité énergétique des véhicules à moteur à combustion interne (MCI) qu'ils vendent, ainsi qu'en remplaçant ces véhicules par des véhicules électriques à batterie (VEB) ou des véhicules hybrides rechargeables (VHR). Le Canada emboîte généralement le pas en matière de normes d'émissions des véhicules des États-Unis, qui, sous l'administration Biden, devraient, à partir de l'été 2021, réduire progressivement les émissions moyennes des nouveaux véhicules jusqu'en 2026 seulement. La rigueur de ces normes devrait probablement perdurer. Dans le cadre de ce rapport, nous explorons la possibilité d'adopter des normes d'émissions de GES canadiennes plus strictes qui permettrait d'atteindre l'objectif de vente de VZE pour 2035.

Troisièmement, nous envisageons un système de redevance-remise qui impose des frais à l'achat de véhicules énergivores et offre des subventions pour les véhicules à faibles émissions et les VZE. Un tel programme peut être conçu de façon à s'autofinancer, ce qui évite la grande quantité de dépenses publiques requises pour l'approche qui propose uniquement des subventions à l'achat des VZE.[12] Des programmes de redevance-remise ont été appliqués dans quelques pays au cours des dernières décennies, mais ils n'ont généralement pas été en mesure de faire progresser le parc de véhicules vers l'atteinte des objectifs de décarbonisation en raison de remises ou redevances inefficaces. Équiterre a récemment proposé une approche de redevance-remise comme moyen d'atteindre les objectifs climatiques canadiens (appuyée par la Fondation David Suzuki).[13] Dans ce rapport, nous envisageons donc un régime de redevance-remise qui pourrait permettre d'atteindre les objectifs de vente de VZE de 2035.

Nous considérons également plusieurs combinaisons de ces politiques, car l'histoire et la recherche montrent que les politiques climatiques sont le plus souvent mises en œuvre en simultané, en particulier dans le secteur des transports.[14] Ensuite, nous explicitons nos objectifs de recherche, le modèle de simulation (*AUM*), nos scénarios de politiques et nos résultats.

12 Bhardwaj, C., Axsen, J. & McCollum, D. Simulating automakers' response to zero emissions vehicle regulation. Transportation Research Part D: Transport and Environment 94, 102789, doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102789 (2021).

13 Bhardwaj, C., Axsen, J. & McCollum, D. Simulating automakers' response to zero emissions vehicle regulation. Transportation Research Part D: Transport and Environment 94, 102789, doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102789 (2021).

14 Bhardwaj, C., Axsen, J. & McCollum, D. Simulating automakers' response to zero emissions vehicle regulation. Transportation Research Part D: Transport and Environment 94, 102789, doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102789 (2021).

2. Objectifs de la recherche

Nous visons principalement à simuler les répercussions de politiques et de combinaisons de ces politiques sur les ventes de VZE au Canada, par rapport aux objectifs de ventes de 50 % d'ici 2030 et de 100 % d'ici 2035. Plus précisément, nous modélisons les politiques canadiennes actuelles comme « référence » (tarification du carbone, subventions à l'achat de VZE et réglementation), et nous y introduisons :

- Trois formes de normes VZE qui varient selon le type de VZE requis (une version « neutre » qui inclut les VHR] et les VEB, une deuxième qui impose un plafond de 50 % sur les VHR à compter de 2030; et une autre qui n'autorise que les VEB à partir de 2030);
- Des normes d'émissions de GES des véhicules légers suffisamment rigoureuses pour atteindre la cible de vente de VZE de 2035;
- Un système de redevance-remise conçu pour permettre d'atteindre la cible de vente de VZE pour 2035, tout en étant capable de s'autofinancer (en remplacement des programmes de subvention national et provinciaux);
- Plusieurs combinaisons des politiques ci-dessus (norme VZE, normes d'émissions de GES des véhicules ou système de redevance-remise).

Nous comparons également ces scénarios entre eux en regardant leur capacité à réduire les émissions de GES et leur rentabilité (que nous définissons comme étant l'« efficacité »). Nous mesurons cette rentabilité par le biais du coût en dollars canadiens ($) par tonne évitée de CO_2 ($/tonne), en tenant compte des répercussions des politiques sur l'utilité de la consommation et les recettes des constructeurs automobiles.[15] Dans le présent rapport, nos calculs de rentabilité ne tiennent pas compte des avantages connexes, comme les améliorations en matière de pollution atmosphérique, de pollution par le bruit, de santé publique et de sécurité routière. L'inclusion de ces avantages connexes réduirait probablement les coûts de chaque scénario stratégique que nous examinons ici, bien que nous nous attendions à ce que le classement relatif de ces derniers demeure le même. Nos résultats fournissent également des détails sur les dépenses totales du gouvernement pour chaque scénario (uniquement en fonction des versements de subventions, moins les frais perçus dans le cas d'un système de redevance-remise).

En résumé, les extrants clés de chaque scénario comprennent :

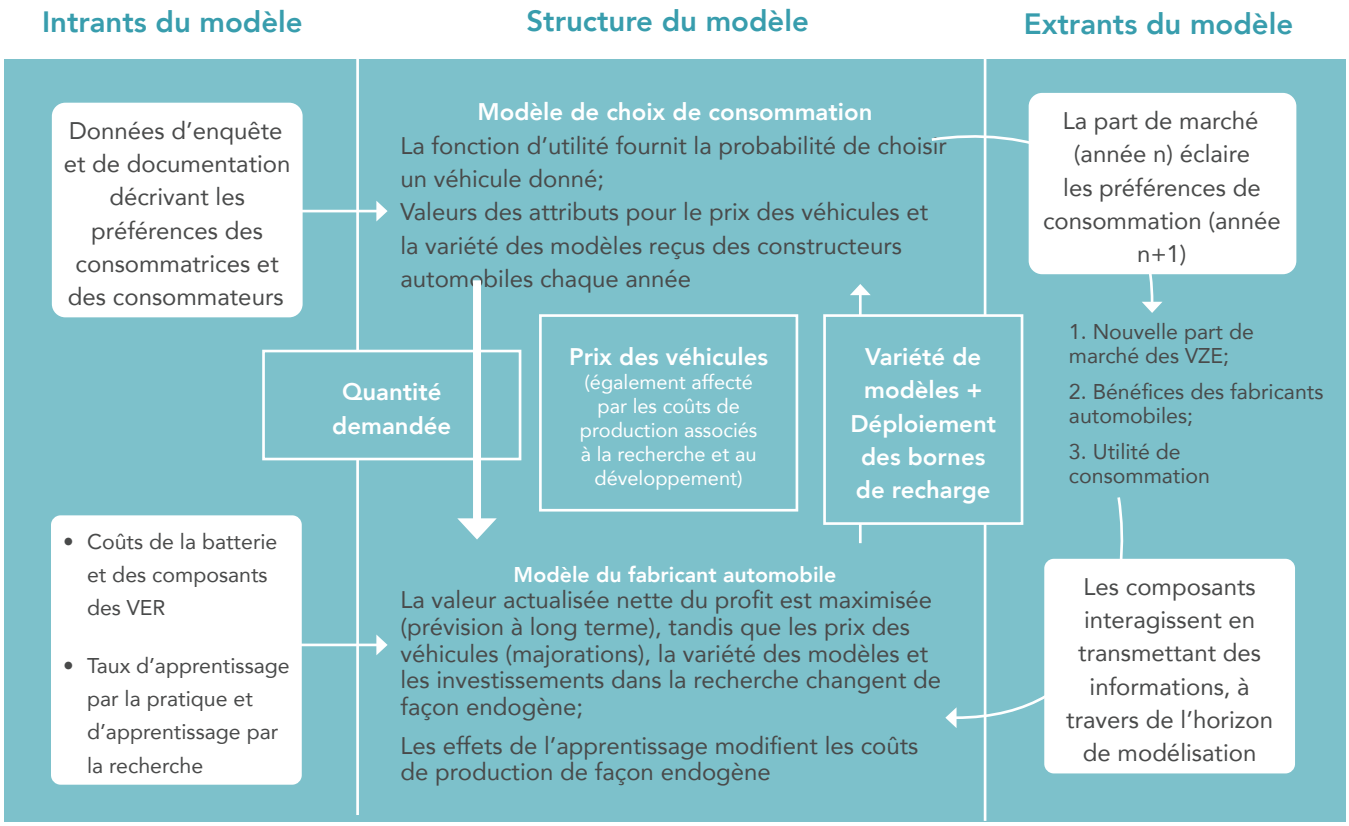
- la nouvelle part de marché des VZE du Canada pour les véhicules légers au cours de la période 2020-2035 ;
- les émissions de GES des véhicules légers du Canada au cours de la période 2020-2035, présentées sous forme de totaux de mégatonnes (Mt) ;
- les coûts globaux de chaque scénario lié à une politique, le surplus de consommation et les profits des fabricants d'automobiles, par politique, ramenés à la valeur actualisée nette en utilisant des taux d'actualisation de 3 % et de 8 %;
- les dépenses publiques directes liées à chaque scénario, c'est-à-dire le montant total dépensé par le gouvernement en subventions (moins les « frais » liés au programme de redevance-remise); et
- l'analyse de l'incertitude (chaque scénario explorant une politique est simulé à l'aide d'hypothèses de paramètres de valeur « médiane », ainsi que des valeurs de paramètres « pessimistes » et « optimistes »).

15 L'utilité de la consommation est une mesure du bien-être qu'un consommateur ou qu'une consommatrice retire de l'achat d'un bien (comme un véhicule) ou d'une action (conduire une voiture ou prendre l'autobus pour un voyage). Cette mesure peut être monétisée sous forme de volonté de payer

3. *AUtomaker-Consumer Model (AUM)*

Nous utilisons le modèle *AUtomaker-Consumer (AUM)* pour simuler les répercussions de ces politiques sur le secteur des véhicules légers au Canada. Ce modèle se distingue en ce sens qu'il simule les interactions entre les consommatrices et les consommateurs, qui sont réalistes sur le plan comportemental, et le secteur de l'automobile, comme illustré à la figure 1.[16] Plus précisément, le constructeur modèle (ou le fournisseur de véhicules) et le consommateur modèle interagissent par transfert de données à l'intérieur d'un délai d'un an. L'AUM représente de manière endogène un agrégat de constructeurs automobiles (plutôt que plusieurs constructeurs automobiles entrant en concurrence) qui prend des décisions dans le but de maximiser le profit sur l'horizon temporelle prévue par la modélisation. Le constructeur automobile possède une vision pluriannuelle et prend chaque année des décisions sur sujets suivants : i) l'augmentation de la variété des modèles de VZE, ii) les subventions à prix croisés attribuées à l'interne et iii) l'investissement dans la recherche et le développement dans le but de réduire les coûts futurs des VZE.

Figure 1. Structure du modèle d'adoption de la technologie du modèle *AUM*



À titre d'exemple, le modèle de constructeur automobile décide du prix et du nombre de modèles de véhicules disponibles, tandis que chaque année, les consommatrices et les consommateurs demandent un certain nombre de véhicules. Pour une année donnée, les principaux extrants du modèle sont les ventes de VZE (en proportion des ventes de véhicules légers), les profits des constructeurs automobiles et l'utilité de la consommation. Le modèle *AUM* tient également compte du stock de véhicules et estime les émissions de GES sur la durée de vie du des véhicules.

16 Bhardwaj, C., Axsen, J. & McCollum, D. Simulating automakers' response to zero emissions vehicle regulation. Transportation Research Part D: *Transport and Environment* 94, 102789, doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102789 (2021).

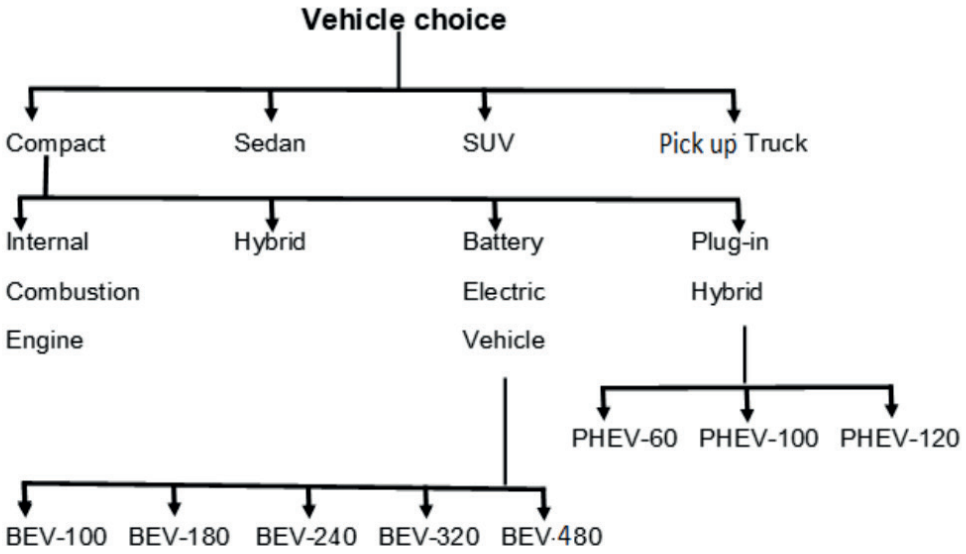
Dans les premières études, le modèle *AUM* a été établi pour un horizon de 2020 à 2030.[17] Une partie importante de la présente étude consistait à étendre l'horizon temporel du modèle *AUM* jusqu'en 2020-2035. Le recalibrage du modèle est décrit en annexe. Dans les sous-sections suivantes, nous résumons les modèles sur l'« offre » et la « demande », la méthode utilisée pour calculer les coûts des politiques et le processus de validation utilisé pour calibrer le modèle *AUM*.

3.1 Modèle axé sur la demande

Le modèle de choix de consommation simule les ventes annuelles de véhicules légers et les parts de marché au Canada de 2020 à 2035. Les ventes totales de véhicules sont à leur tour influencées par la tarification offerte par le modèle du constructeur automobile à l'aide de l'élasticité par rapport au prix (qui capte le pourcentage de diminution des ventes de véhicules pour chaque augmentation de 1 % du prix d'achat moyen des véhicules). Chaque année, les consommatrices et les consommateurs choisissent de nouveaux véhicules parmi les options disponibles. Cette réponse à la demande génère annuellement des ventes de véhicules légers, qui sont divisées en quatre catégories de transmission, soit les véhicules à MCI, les véhicules hybrides, les VHR et les VEB.

Le modèle de consommation est un modèle de choix discrétionnaire comprenant différents niveaux (figure 2). Au premier niveau, la personne consommatrice choisit parmi différentes classes de véhicules (compacte, berline, VUS ou camionnette). Au deuxième niveau, cette personne choisit parmi les transmissions disponibles, celles-ci allant jusqu'à quatre : MCI, hybride, VHR ou VEB. Comme nous l'expliquerons plus en détail, la disponibilité d'un type de transmission précis au cours d'une année donnée est déterminée par le constructeur automobile modèle. Pour certaines transmissions (VHR et VEB), un troisième niveau de choix discrétionnaire est offert : le choix de la propulsion électrique du véhicule. Les VHR peuvent avoir une autonomie de 60, 100 et 120 kilomètres, et les VEB, une autonomie de 100, 180, 240, 320 et 480 kilomètres.

Figure 2. Niveaux des choix de consommation dans le modèle *AUM*



17 Bhardwaj, C., Axsen, J. & McCollum, D. Simulating automakers' response to zero emissions vehicle regulation. Transportation Research Part D: *Transport and Environment* 94, 102789, doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102789 (2021).

Les consommatrices et consommateurs choisissent la technologie de véhicule qui leur est la plus profitable, selon sa fonction d'utilité. Celle-ci indique l'utilité tirée de la consommation de la technologie du véhicule i, et elle s'inspire en grande partie du modèle *LAVE-Trans*.[18] Cette fonction est :

$$U_i = ASC + \beta_{PP}X_{PP} + \beta_{FC}X_{FC} + \beta_{CA}X_{CA} + \beta_R X_R + \beta_{MV}X_{MV} \quad (1)$$

Où l'utilité à la consommation est influencée par le prix d'achat de la technologie du véhicule (PA), le coût du carburant (CC), l'autonomie de la propulsion électrique (A), l'accès à la recharge (AR) et la variété de modèles de véhicules (VM). Le prix d'achat précise le prix du véhicule (coût du véhicule + majoration ajoutée par le fabricant automobile) ; il s'agit du prix proposé aux consommatrices et aux consommateurs. Le coût du carburant indique les coûts d'utilisation annuels d'un véhicule. L'autonomie électrique du véhicule indique le nombre de kilomètres qu'un véhicule peut parcourir sans devoir être rechargé. L'accès à la recharge est associé au pourcentage de stations de recharge et de ravitaillement en carburants avec recharge électrique par rapport aux stations-service.[19]

La variété des modèles, exprimée sous forme de logarithme naturel du pourcentage de modèles par rapport aux véhicules classiques, exprime l'idée que la disponibilité des modèles de VEB et de VHR (n_j) est limitée. Ce manque d'offre a un impact sur les décisions d'achat des consommatrices et consommateurs. La valeur incarnant la variété de modèles est donnée par le logarithme du ratio (*nj/N*, Nétant le nombre de modèles de véhicules classiques).[20] Par exemple, en 2020, il y a seulement 28 modèles de VHR qui existent au Canada, comparativement à environ 300 pour les véhicules classiques. Ainsi, en 2020, la variété des modèles de VHR correspond à environ 10 % des véhicules classiques.

L'*Alternative Specific Constant* (ASC) ccontient l'élément d'utilité non saisi par d'autres attributs.

La probabilité $P_{i|j}$ (indiquant la part de marché [PM]) d'une consommatrice ou un consommateur choisissant une technologie « i » est ensuite donnée par :

$$P_{i|j}(MS) = \frac{e^{U}i}{\sum_{k=1}^{n} e^{Uk}}$$

La probabilité que la technologie i soit sélectionnée est le produit de la probabilité de choisir une catégorie *j* (*j* représente une catégorie de niveau 1 ou 2 tel qu'illustré à la figure 2) et la probabilité de choisir i, étant donné qu'un choix sera fait à partir de la catégorie *j* : *Pij = Pilj*Pj*.

Nous utilisons des sources de données empiriques pour alimenter notre équation d'utilité de la consommation. Les valeurs associées à l'année de référence de l'*ASC* et les éléments de pondération de l'année de base pour les autres attributs de l'équation (1) sont en grande partie dérivées empiriquement des données provenant des études de la Canadian Plug-in Electric Vehicle Study (CPEVS) et de la Canadian Zero Emissions Vehicle Study (CZEVS)[21,22]

18 National Research Council. Transitions to alternative vehicles and fuels. (National Academies Press, 2013).

19 Hackbarth, A. & Madlener, R. Willingness-to-pay for alternative fuel vehicle characteristics: A stated choice study for Germany. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 85, 89-111, doi: https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.12.005 (2016).

20 Greene, D. L. TAFV alternative fuels and vehicles choice model documentation. (Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory, Center for Transportation Analysis, 2001).

21 Axsen, J., Bailey, J. & Castro, M. A. Preference and lifestyle heterogeneity among potential plug-in electric vehicle buyers. *Energy Economics 50*, 190-201, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2015.05.003 (2015).

22 Kormos, C., Axsen, J., Long, Z. & Goldberg, S. Latent demand for zero-emissions vehicles in Canada (Part 2): Insights from a stated choice experiment. Transportation Research Part D: Transport and Environment 67, 685-702, doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.10.010 (2019).

et en partie de la littérature internationale.[23,24,25] Le tableau 1 présente la disposition des consommatrices et des consommateurs à payer pour les différents attributs au cours de l'année de référence. La CPEVS comprenait une enquête en trois parties menée par un échantillon représentatif de 1754 ménages canadiens qui ont acheté un véhicule neuf en 2013, tandis que la CZEVS est essentiellement une version de cette enquête datant de 2017. Ces deux études contiennent des réponses aux questions du sondage sur la sensibilisation aux VZE, la distance de conduite hebdomadaire, la classe souhaitée pour son prochain véhicule et les préférences pour les caractéristiques des véhicules. Le modèle de choix des classes latentes a été utilisé pour déterminer cinq catégories de consommatrices et consommateurs hétérogènes dans l'échantillon pour les deux enquêtes et dont il est question plus loin.

23 Brand, C., Cluzel, C. & Anable, J. Modeling the uptake of plug-in vehicles in a heterogeneous car market using a consumer segmentation approach. Transportation Research Part A: Policy and Practice 97, 121-136, doi: https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.01.017 (2017).

24 Dimitropoulos, A., Rietveld, P. & van Ommeren, J. N. Consumer valuation of changes in driving range: A meta-analysis. T*ransportation Research Part A: Policy and Practice* 55, 27-45, doi: https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.08.001 (2013).

25 Ferguson, M., Mohamed, M., Higgins, C. D., Abotalebi, E. & Kanaroglou, P. How open are Canadian households to electric vehicles? A national latent class choice analysis with willingness-to-pay and metropolitan characterization. Transportation Research Part D: *Transport and Environment 58*, 208-224, doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.12.006 (2018).

Tableau 1. Liste des attributs et des valeurs correspondantes estimées de la volonté de payer (VDP) de leurs coefficients

Attributs	VDP ($)			Fourchette selon la littérature ($)	Sources ayant des valeurs comparables de VDP
	Enthousiasme pour les VZE (15 %)	Démocratisation (50 %)	Résistance (35 %)		
Prix d'achat	-	-	-		Axsen et coll. (2015), Kormos et coll. (2019)
Coût de carburant par tranche de 1 000 $ par année en économies de carburant	6 000	4 000	2 000	(1 000,7 000)	Brand et coll. (2017)
Autonomie de conduite Augmentation de l'autonomie électrique par kilomètre	30	15	15	(20,200)	Ferguson et coll. (2018); Dmitripoulos et coll. (2013)
Variété des modèles Logarithme naturel de 1 % d'augmentation du nombre de modèles de véhicules électriques par rapport aux VC	3 500	3 500	3 500	(0,10000)	Brand et coll. (2017); Greene (2001)
Accès à la recharge (pour une augmentation de 1 % des stations de recharge	550	550	550	(100,1000)	Ferguson et coll. (2018); Hackbarth et Madlener (2016)
***ASC* en 2020** **VHR** **VEB** **Véhicule hybride** ***ASC* en 2035** (optimistes, médianes, pessimistes) **VHR** **VEB** **VH**	5 000 8 000 3 000 (2 275, 2 030, 1 800) (4 020, 2 750, 2 150 (0,0,0)	-10 000 -15 000 -3 000 (0, -2400, -3050) (0, -3850, -5535) (0, 0, 0)	-3 0000 -4 0000 -5 000 (0, -8954, -15 000) (0, -13 500, -20 000) (0, 0, 0)	(-50 000, 8 000)	Axsen et coll. (2015), Kormos et coll. (2019)

Pour simuler la dynamique des préférences de consommation, les paramètres d'*ASC* changent de façon endogène au fil du temps en fonction des ventes cumulatives de véhicules possédant la technologie de transmission k (conventionnelle, électrique à batterie ou hybride rechargeable) comme suit :

$$ASC_{tk} = ASC_{ok} \, X \, e^{b(\text{cumulative sales of drivetrain technology k in Canada})} \qquad (3)$$

Où ASC_{ok} représente la valeur du paramètre *ASC* au moment *t=0* pour la technologie *k* ; *b* = constante (utilisée par le Conseil national de recherches Canada).[26] À mesure que de plus en plus de VZE sont achetés, on suppose que les préférences des consommatrices et consommateurs à l'égard de la technologie s'amélioreront grâce à une plus grande sensibilisation, à une meilleure acceptation et à une amélioration de la performance technologique. Cette « action par osmose » et sa base empirique sont présentés plus en détail dans Axsen et coll.,[27] et ont été utilisés pour représenter les préférences des VZE dans des modèles d'adoption de technologies comme SCMI,[28] *LAVE-Trans*[29] et *REPAC*.[30]

Bien que les données pour tous les attributs de l'équation (1) pour la première année de modélisation soient précisées de façon exogène, les données pour chaque attribut pour les années restantes sont déterminées de façon exogène (pour les prix du carburant et la disponibilité des bornes de recharge, tableau 2) ou endogène en tant qu'intrants du modèle du constructeur automobile. Comme le montre la figure 1, le prix d'achat des véhicules et les valeurs de la variété des modèles sont tirés du modèle de constructeur automobile. Cependant, la variété de modèles comprend aussi une composante exogène, servant à représenter l'augmentation mondiale du nombre de modèles. Les hypothèses exogènes concernant la variété du modèle sont également énumérées au tableau 2.

Pour représenter l'hétérogénéité dans les préférences de consommation, nous incluons trois segments de consommatrices et de consommateurs : « Enthousiasme pour les VZE » (15 % des personnes consommatrices), « Démocratisation » (50 %) et « Résistance » (35 %). Ces divisions proportionnelles sont exogènes et constantes à travers l'horizon de modélisation. La dynamique dans les préférences est plutôt représentée par des changements dans l'ASC pour un segment donné. Comme on l'a vu, ces trois catégories sont tirées des cinq catégories de consommateurs et consommatrices qui ont été identifiées dans des recherches antérieures auprès du public canadien.[31,32] Premièrement, les personnes démontrant de l'enthousiasme pour les VZE ont une vision très positive (aversion négative pour le risque) pour les VZE. Les personnes du segment « Résistance » privilégient les véhicules conventionnels et perçoivent les VZE de manière très négative. La troisième catégorie, « Démocratisation », rassemble les personnes démontrant un préjugé initial modéré contre les VZE.

26 National Research Council. Transitions to alternative vehicles and fuels. (National Academies Press, 2013).

27 Axsen, J., Mountain, D. C. & Jaccard, M. Combining stated and revealed choice research to simulate the neighbor effect: The case of hybrid-electric vehicles. *Resource and Energy Economics* 31, 221-238 (2009).

28 Sykes, M. & Axsen, J. No free ride to zero-emissions: Simulating a region's need to implement its own zero-emissions vehicle (ZEV) mandate to achieve 2050 GHG targets. *Energy Policy* 110, 447-460, doi: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.08.031 (2017).

29 Greene, D. L., Park, S. & Liu, C. Analyzing the transition to electric drive vehicles in the U.S. *Futures* 58, 34-52, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.futures.2013.07.003 (2014).

30 Wolinetz, M. & Axsen, J. How policy can build the plug-in electric vehicle market: Insights from the respondent-based preference and constraints (REPAC) model. *Technological Forecasting and Social Change* 117, 238-250 (2017).

31 Axsen, J., Mountain, D. C. & Jaccard, M. Combining stated and revealed choice research to simulate the neighbor effect: The case of hybrid-electric vehicles. *Resource and Energy Economics* 31, 221-238 (2009).

32 Kormos, C., Axsen, J., Long, Z. & Goldberg, S. Latent demand for zero-emissions vehicles in Canada (Part 2): Insights from a stated choice experiment. Transportation Research Part D: Transport and Environment 67, 685-702, doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.10.010 (2019).

Tableau 2. Valeurs optimistes, médianes et pessimistes pour les paramètres clés du modèles

	2020	2030			2035			
Paramètres	**Valeurs**	**Médianes**	**Optimistes**	**Pessimistes**	**Médianes**	**Optimistes**	**Pessimistes**	**Source**
Variété des modèles (par rapport aux véhicules conventionnels)	10 %	70 %	90 %	40 %	100 %	100 %	60 %	Jugement des auteurs
Accès à la recharge (%, par rapport aux stations-service)	10 %	70 %	90 %	50 %	100 %	100 %	60 %	Jugement des auteurs
Prix de l'essence ($ CA/litre, excluant le prix du carbone)	0,83	1,02	1,18	0,7	0,65	1,15	0,51	Office national de l'énergie (2019), EIA des États-Unis (2020), EIA (2020); Knuemo (2021)
Coût des batteries ($/kWh en 2020)	230	100	70	130	50	40	100	Lutsey et coll. (2021)
Élasticité du prix à la consommation pour l'achat d'un véhicule (2020-2035)	-0.6	-0.6	-0.3	-1	-0.6	-0.3	-1	Fouquet (2012); Holmgren, (2007)
Élasticité de la demande en transport des consommateur(trice)s (2020-2035)	-0,2	-0,2	-0,15	-0,25	-0,2	-0,15	-0,25	Small et van Dender (2007)
Vitesse de réaction des constructeurs automobiles (%) (2020-2035)	8	8	10	6	8	10	6	Weiss et coll. (2012), Barreto et Kypreos (2004)
Automaker discount rate (%) (2020-2035)	10	10	8	15	10	8	15	Jagannathan et coll. (2016)

3.2 Modèle axé sur l'offre

Le modèle d'offre de véhicules est conçu pour représenter l'industrie automobile canadienne au niveau agrégé. Bien qu'il serait intéressant de simuler et d'observer le comportement d'un ensemble hétérogène de constructeurs automobiles dans les applications futures de ce modèle, la présente étude porte davantage sur les répercussions globales des politiques à l'échelle de l'industrie que sur les répercussions sur des constructeurs automobiles particuliers. À l'avenir, le modèle *AUM* pourrait explorer la représentation de nombreux constructeurs automobiles hétérogènes, y compris les répercussions de leurs différentes stratégies de conformité, leurs approches à l'égard de l'innovation, les retombées de la recherche et développement (R&D), et l'échange de crédits de conformité (pour une norme VZE et des normes d'émissions de GES qui permettant ces échanges).

Le constructeur automobile agrégé cherche à maximiser la valeur actuelle nette de ses profits au cours de l'horizon de planification, que nous pouvons établir comme n'importe quel nombre d'années situé à l'intérieur de l'horizon de modélisation (dans ce cas-ci, de 2020 à 2035). Dans le modèle AUM, au cours d'une année donnée, le fabricant automobile planifie ses activités (l'horizon à plein temps existe jusqu'en 2035 à l'heure actuelle) et prend plusieurs décisions relatives à toutes les technologies de transmission, notamment :

- Accroître les investissements en R&D (ce qui peut contribuer en partie à réduire les coûts des VZE à l'échelle nationale au fil du temps, mis à part la baisse exogène mondiale des coûts des batteries et d'autres composantes).
- Augmenter le nombre de modèles de VZE disponibles à la vente.
- Accélérer le déploiement des bornes de recharge et intégrer de façon endogène la contribution partielle du fabricant d'automobiles à l'infrastructure de recharge. En d'autres termes, le fabricant automobile peut choisir d'investir dans des infrastructures de recharge supplémentaires, si cela l'aide à se conformer à la politique de façon rentable, à l'image de ce que fait Tesla en développant son propre réseau d'infrastructures de recharge.
- Modifier les prix de tous les véhicules vendus lorsque le fabricant automobile ajuste les prix relatifs des véhicules (p. ex., en subventionnant les VZE et en faisant payer un prix plus élevé à l'achat de véhicules conventionnels), tout en essayant de maximiser les profits assujettis aux politiques en place.

Le constructeur automobile cherche à maximiser ses profits sur l'horizon de planification T pour toutes les technologies 1 à K, précisées comme suit :

$$Profits = \sum_{t=1}^{T} \frac{1}{(1+i)^t} \sum_{k=1}^{K} \left[Q_{tk}\left(P_{tk}, n_{ctk}, CA_{ctk}\right).P_{tk} - C_{Ptk} - C_{Rtk} - C_{Itk} \right] \quad (4)$$

Où $Q_{tk}(Ptk,n_{ctk},CA_{ctk})$ représente la quantité de chaque type de véhicule *k* produit pendant une durée t^{th} et la quantité est fonction du prix P_{tk}, et du nombre de modèles n_{ctk} du type de véhicule *k* n_{ctk} is ajouté de façon endogène par le fabricant automobile canadien, en plus de l'augmentation exogène du nombre de modèles à l'échelle mondiale. De même, CA_{ctk} incarne la contribution endogène du fabricant automobile canadien à l'accès à la recharge (en pourcentage), en plus de l'augmentation exogène à ce même accès. Le taux d'actualisation est fixé à 8 %, ce qui reflète le coût de renonciation du capital pour les entreprises privées.[33] Le constructeur automobile ajuste donc P_{tk}, n_{ctk}, CA_{ctk} *and* C_{Itk} dans l'équation (4) de manière à maximiser les profits. On suppose que la quantité de véhicules de chaque type produit est égale à la quantité demandée dans le modèle de choix de consommation. L'inclusion d'une rétroaction portant sur la variété des modèles et le déploiement endogène des bornes de recharge sont des nouveautés s'ajoutant au modèle *AUM*. L'équation des profits (4) comprend également trois termes réels (C_{Ptk},C_{Rtk}, C_{Itk}), : tous sont décrits brièvement ci-dessous.

33 Jacobsen, M. R. Evaluating US Fuel Economy Standards in a Model with Producer and Household Heterogeneity. *American Economic Journal: Economic Policy 5*, 148-187 (2013).

Premièrement, C_{Ptk} représente le coût total de production d'un type de technologie de véhicule *k* dans le temps *t*, représenté par l'équation suivante :

$$C_{Ptk} = C_{0tk} * Q_{tk}\left(P_{tk}, n\right) + a * Q_{tk}\left(P_{tk}, n\right)^2 \qquad (5)$$

Où C_{0tk} st le coût de production d'un seul véhicule de type *k* dans le temps *t*, *a* est une constante de mise à l'échelle (tableau 3) et$Q_{tk}(P_{tk},n)$ représente la quantité totale de véhicules de type k produits dans le temps *t*. L'équation quadratique de la courbe des coûts indique le résultat des déséconomies d'échelle.

Tableau 3. Paramètres exogènes utilisés dans le modèle du constructeur automobile

Paramètres	Valeur	Source
Paramètre de mise à l'échelle, *a* (équation 5) véhicules conventionnels (VC)	0,01	ugement des auteurs, fondé sur le calibrage du modèle en fonction de la part de marché réelle de VC en 2018
Paramètre de mise à l'échelle, *a* (équation 5) VER	0,02, décroît linéairement à 0,015 en 2030	Jugement des auteurs, fondé sur le calibrage du modèle en fonction de la part de marché réelle de VER en 2018;
Capacité cumulative (*CC*) en 2020 (*CC*) VC in 2020	25 millions	Statistiques Canada (2020)
Capacité cumulative (*CC*), VER en 2020	100 000	Statistiques Canada (2020)
Stock de connaissances, VC en 2020	500 G$ CA	Calcul des auteurs; fondé sur Barreto et Kypreos (2004)[34]
Stock de connaissances, VER en 2020	3 G$ CA	Calcul des auteurs; fondé sur Barreto et Kypreos (2004)[35]

Le deuxième terme réel de l'équation (4), C_{Rtk}, iindique le total des coûts liés à la réglementation en lien avec la politique, représenté comme suit :

$$C_{Rtk} = \rho_{ZEV} * (\emptyset_{ZEV} * Q_{Total} - Q_{ZEV}) + \rho_{FE} * Q_k * (Z_{FE} - Z_k) \qquad (6)$$

Nous modélisons de façon endogène le mandat du VZE et la norme sur les émissions de GES des véhicules dans le cadre de la fonction de la rentabilité. Le coût de la réglementation associé au mandat relatif aux VZE est ensuite modélisé comme suit : $P_{ZEV}*(\emptyset_{ZEV}*Q_{Total}-Q_{ZEV})$, dans laquelle P_{ZEV} représente la pénalité par crédit de VZE en deçà du quota stipulé, $\emptyset_{ZEV}$ est le minimum de crédits de VZE requis par le quota (p. ex., 4 %), Q^{Total} représente le nombre total de véhicules vendus par le fabricant, et Q_{ZEV} est le nombre total de VZE vendus par le fabricant. De manière similaire, pour les normes d'émissions de GES des véhicules, le coût de la réglementation est $P_{FE}*Q_k*(Z_{FE}-Z_k)$, dans laquelle P_{FE} est la pénalité, Q_k est le nombre de véhicules possédant la technologie de transmission k qui sont vendus, Z_{FE} est la limite d'économie de carburant, et Z_k représente l'économie de carburant du véhicule *k*.

34 Barreto, L. & Kypreos, S. Endogenizing R&D and market experience in the "bottom-up" energy-systems ERIS model. *Technovation 24*, 615-629 (2004).

35 *Ibid*

Le troisième élément inclus dans le coût de l'équation (4), C_{Itk} représente l'investissement en R&D des constructeurs automobiles canadiens. Nous supposons que le coût de production (C_{0tk} de l'équation 5 ci-dessus) des véhicules produits au Canada peut être en partie influencé par l'investissement dans la recherche, C_{Itk} effectué par les constructeurs automobiles à l'échelle nationale au fil du temps (mis à part la baisse exogène des coûts des véhicules attribuable aux efforts mondiaux), comme suit :

$$C_{0tk} = \left\{ \gamma_k * C_{0t-1,k} * \left[CC_{t-1k}^{-LBD} + KS_{t-1,k}^{-LBS} \right] \right\} \qquad (7)$$

Le coût de production de chaque technologie de transmission, C_{0tk} omporte deux composantes distinctes qui influent sur l'évolution des coûts au fil du temps. Premièrement, les coûts d'investissement peuvent diminuer en raison de la production qui se produit ailleurs dans le monde, où Y_k représente le taux annuel de la baisse exogène du coût de production (à l'échelle mondiale). Par conséquent, le coût d'un véhicule peut encore diminuer au fil du temps, même si la production ou les investissements sont faibles ou inexistants au Canada. Deuxièmement, les coûts de production diminuent de façon endogène en raison d'une augmentation de la production cumulative et de l'investissement en recherche dans cette technologie au Canada. Le coût de production de chaque technologie de transmission C_{0tk} à temps t est influencé de façon endogène par le coût de production de l'année précédente $C_{0t-1,k}$, par la capacité cumulative CC_{t-1k} (nombre total de véhicules de technologie k produits jusqu'à *t-1* au Canada) ainsi que par le stock de connaissances $KS_{t-1,k}$ (synonyme d'investissement cumulatif en R&D au Canada) atteint jusqu'à la période *t-1*.

Ainsi, alors que, d'une part, l'investissement dans la recherche augmente les coûts actuels des fabricants d'automobiles, d'autre part, cet investissement réduit potentiellement les coûts de production futurs. En ce qui concerne l'optimisation dans un horizon de planification, le constructeur peut faire un compromis entre l'augmentation des coûts de recherche actuels et les avantages découlant de la baisse des coûts de production à une date ultérieure. Les valeurs concernant les dépenses d'investissement initiales, le stock de connaissances initial, la capacité cumulative initiale ainsi que l'apprentissage par la pratique et par la recherche sont précisées de façon exogène dans le modèle (tableau 3).

3.3 Coûts des politiques

Le modèle *AUM* simule les répercussions de la ou des politique(s) sur l'utilité de la consommation (surplus de consommation) et sur les bénéfices des constructeurs automobiles. Nous définissons le coût cumulatif de la ou des politique(s) comme étant la somme des variations de la rente et des bénéfices de consommation dans le cadre d'un scénario de politique par rapport au scénario de référence. Nous traduisons cela en calcul de la rentabilité des politiques en dollars canadiens en tonnes de CO_2 évitées ($/tonne) en simulant la réduction des émissions entrapinée par la ou les politique(s).

La variation nette du surplus de consommation (SC) dans les scénarios des politiques [« 1 »] par rapport à la référence [« 0 »] est obtenue par :

$$\Delta CS = \frac{1}{\beta_{PP}} \left[\ln ln \left(\sum_{i=1}^{n} e^{Ui^1} \right) - \ln ln \left(\sum_{i=1}^{n} e^{Ui^0} \right) \right. \qquad (8)$$

U_i= utilité de la technologie 'i' comme dans l'équation (1), et $ß_{PP}$ est le coefficient du prix d'achat.

De même, la variation des bénéfices (équation 4, à la section 3.2) peut être additionnée pour donner le total des coûts privés pour les constructeurs automobiles. Le surplus de consommation peut être affecté par les changements suivants, ceux-ci pouvant être provoqués par la politique :

- Réduction des ventes totales de véhicules en vertu de la politique (en grande partie en raison des coûts de possession plus élevés);
- Hausse des prix des véhicules;
- Perte d'agrément : la perte d'utilité ou de bien-être découlant du fait que les consommatrices et les consommateurs doivent passer à un véhicule moins souhaitable (comme le passage des camions aux voitures, ou des véhicules conventionnels aux VZE);
- Économies de carburant (coûts négatifs) bénéficiant aux consommatrices et consommateurs en raison du passage à un véhicule plus écoénergétique suite à la mise en œuvre de la ou des politique(s).

Le choix du taux d'actualisation utilisé dans le calcul de la valeur actualisée nette peut également avoir une incidence importante sur les estimations des coûts environnementaux et politiques dans toute étude de modélisation. Dans la littérature, on retrouve d'importantes différences portant sur le choix des taux d'actualisation. Lorsqu'on a recours à ces derniers pour prendre des décisions financières privées (p. ex., constructeurs automobiles), ces taux ont tendance à être plus élevés, tournant souvent autour de 8 %.[36] D'autre part, pour représenter les décisions sociales, certaines études de modélisation utilisent un taux d'actualisation plus bas, par exemple le taux de 2,3 % employé par Greene et coll.[37] Pour tenir compte des deux points de vue, nous calculons et décrivons les coûts globaux des politiques à l'aide d'un taux de 8 % et d'un taux de 3 %.

3.4 Calcul des émissions de GES

Nous suivons plusieurs étapes supplémentaires pour calculer les émissions totales de GES des véhicules légers. Nous calculons le stock total de véhicules et leur utilisation, puis nous attribuons des valeurs de GES à ces véhicules.

Premièrement, le stock total (S_{tk}) de véhicules de chaque type de technologie de type *k* perdurant d'une année t à l'autre *t+1* est donné par :

$$\sum_{k=1}^{N} S_{t+1,k} = \sum_{k=1}^{N} S_{t,k}\,(1\text{-}d_{t,k}) + \sum_{k=1}^{N} Q_{t,k} \qquad (10)$$

Où $d_{t,k}$= taux de renouvellement des stocks à temps *t* pour la technologie *k*; Q_{tk} est la quantité de nouveaux véhicules de technologie *k* au temps *t*.

Deuxièmement, l'utilisation du véhicule (ou les besoins de déplacement) dépend des coûts du carburant. Une augmentation des coûts du carburant (p. ex., en raison d'une taxe) peut réduire la demande en transport, tandis qu'une réduction des coûts du carburant (p. ex., en raison de l'amélioration des économies de carburant) peut accroître cette même demande. Nous utilisons l'élasticité (e) pour représenter la façon dont les consommatrices et consommateurs ajustent les taux d'utilisation des véhicules en fonction des fluctuations du coût associé à la conduite. L'élasticité de la demande en transport est illustrée dans le tableau 2. L'utilisation du véhicule en vertu de la politique (V_p) est une fonction de la demande en transport prévue dans le scénario de référence (V_0), du paramètre d'élasticité (e) et des changements du coût du carburant dans le scénario incluant la politique par rapport à la référence, selon :

$$V_p = V_0 \left(\frac{fuel\ cost_p}{fuel\ cost_0}\right)^e \qquad (11)$$

36 Jacobsen, M. R. Evaluating US Fuel Economy Standards in a Model with Producer and Household Heterogeneity. *American Economic Journal: Economic Policy 5*, 148-187 (2013).

37 Greene, D. L., Park, S. & Liu, C. Analyzing the transition to electric drive vehicles in the U.S. *Futures 58*, 34-52, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.futures.2013.07.003 (2014).

Où *fuel cost*$_P$ est le coût du carburant en vertu de la politique, tandis que *fuel cost*$_0$ est le coût du carburant de référence. D'après les données de 2020 recueillies par Statistique Canada, on suppose que la distance parcourue par véhicule de référence (V_0) au Canada est de 16 000 kilomètres par année.

Une fois que les valeurs du stock de véhicules et de l'utilisation des véhicules sont connues, on peut obtenir les émissions totales de GES en multipliant le produit du stock de véhicules et les valeurs de l'utilisation des véhicules par la consommation d'énergie par véhicule et l'intensité des émissions de carbone du carburant. L'intensité énergétique des véhicules pour chaque transmission est établie de façon exogène en fonction des données de l'*Energy Information Administration* des États-Unis (2020) et de l'Office national de l'énergie (2019) — comme le montre le tableau 4.[38,39] Dans le cas des VHR, nous supposons que les consommatrices et les consommateurs ont recours à de l'électricité pour faire fonctionner les véhicules 70 % du temps et utilisent de l'essence pour les 30 % restants, ce qui se traduit par un « facteur d'utilité » de 70 %. Plotz et coll.[40] ont procédé au calcul de ce facteur d'utilité à partir de données réelles sur la conduite récoltées dans plusieurs pays, ce qui a permis de constater que ce facteur varie en fonction de l'autonomie électrique selon le pays (p. ex., pour un VHR avec une autonomie électrique de 100 kilomètres, le facteur d'utilité était d'environ 70 % au Canada et en Norvège, mais seulement 40 % en Chine et aux Pays-Bas). Pour tenir compte de l'incertitude dans notre analyse de sensibilité, nous supposons que le facteur d'utilité est de 50 % dans le scénario pessimiste et de 90 % dans le scénario optimiste; toutefois, dans chaque scénario, la répartition est exogène et ne réagit pas aux changements des prix du carburant ou de l'électricité.

Tableau 4. Hypothèses relatives à l'intensité énergétique et à l'intensité des émissions de carbone dans le carburant des véhicules au Canada (illustrées seulement pour la catégorie des véhicules automobiles compacts)

Intensité énergétique du véhicule	2020	2035	Source
Conventionnel (L/100 km)	7,55	5,3	Office national de l'énergie (2019), EIA (2020)
VHR (L/100 km : 30 % carburant)	2,2	1,63	Office national de l'énergie (2019), EIA (2020)
VHR (kWh/100 km : 70 % électrique)	0,13	0,10	Office national de l'énergie (2019), EIA (2020)
VEB-320 (kWh/100 km)	0,19	0,16	Office national de l'énergie (2019)
Intensité des émissions de carbone (g de CO_2/MJ)			
Essence (par défaut)	88,1	88,1	Office national de l'énergie (2019); GHGénius
Essence (avec les normes sur les carburants propres)	88,1	76	Gouvernement du Canada (2021)
Électricité	19,5	14	Office national de l'énergie (2019); GHGénius

Le tableau 4 résume également nos hypothèses exogènes au sujet de l'intensité des émissions de carbone « du puits à la roue » de chaque combustible, qui comprend les GES émis dans le processus de production et de

38 US EIA. Annual Energy Outlook. (2020).

39 National Energy Board. (2019).

40 Plötz, P., Moll, C., Bieker, G. & Mock, P. From lab-to-road: real-world fuel consumption and CO_2 emissions of plug-in hybrid electric vehicles. *Environmental Research Letters 16*, 054078, doi: 10.1088/1748-9326/abef8c (2021).

transport d'un combustible jusqu'au moment où il arrive dans un véhicule pour y être consommé au Canada, selon le modèle GHGénius (version 5,05b) et d'autres publications citées ci-dessus (Office national de l'énergie, 2019; EIA, 2020). L'intensité des émissions de carbone diminue avec le temps en vertu des normes sur les carburants propres qui sont sur le point d'être imposées par le gouvernement fédéral. Du point de vue de l'électricité, on suppose que la contribution des sources d'énergie renouvelables à faibles émissions de carbone à la production d'électricité sera amenée à augmenter à l'échelle du Canada grâce aux politiques fédérales visant à remplacer les centrales au charbon et au gaz naturel dans le secteur de l'électricité.

3.5 Analyse de l'incertitude

Nous respectons plusieurs étapes pour explorer et décrire l'incertitude liée aux résultats : (i) déterminer les paramètres clés (énumérés ci-dessous) qui causent le plus d'incertitude dans les extrants du modèle; (ii) présenter les résultats comme étant des marges d'incertitude comportant des hypothèses de valeurs pessimistes et optimistes des paramètres d'entrée déterminant les limites de ces marges d'incertitude et (iii) effectuer une analyse de sensibilité pour explorer la manière dont la variation des paramètres clés influe sur les résultats. Nous testons l'effet des estimations pessimistes et optimistes provenant de la littérature (les valeurs optimistes et pessimistes sont énumérées aux tableaux 2 et 3).

Les principaux paramètres qui influent sur les résultats du modèle sont les suivants :

1. **Coût des blocs-batteries** : comme l'ont constaté les constructeurs d'automobiles (y compris les marges bénéficiaires des fabricants de batteries), les batteries coûtaient 230 $ CA/kWh en 2020, et possèdent une valeur présumée de 40 $ CA/kWh (optimistes) et de 100 $ CA/kWh (pessimistes) en 2035, pris de Lutsey et coll.[41]
2. **L'élasticité-prix** de la demande, qui détermine la façon dont la possession du véhicule est affectée par les prix des véhicules, suppose des valeurs de -0,3 (optimistes) et de -1 (pessimistes), ce qui correspond aux valeurs faibles et élevées suggérées dans la littérature.[42,43]
3. **Le taux d'actualisation** utilisé par le constructeur automobile suppose des valeurs de 8 % (optimistes) et de 15 % (pessimistes), ce qui correspond aux valeurs faibles et élevées suggérées dans Jagannathan et coll. (2016).[44]
4. **Les prix du carburant** (essence, excluant toute taxe carbone) sont considérés comme étant de 0,83 $ le litre en 2020, et supposent des valeurs de 0,51 $ le litre (pessimistes) et de 1,15 $ le litre (optimistes) en 2035. À titre d'exemple, la taxe carbone canadienne prévue ferait augmenter le prix de l'essence de 65 % (en moyenne) en 2035.
5. **Le paramètre de prévision du constructeur automobile** suppose deux valeurs, soit cinq ans (scénario pessimiste, soit une prévision à moyen terme) et dix ans (scénario optimiste, à long terme), conformément aux études antérieures.[45]
6. **Les préférences de consommation** représentent le changement endogène de l'*ASC* au fil du temps (comme le montrent les équations 1 et 3), un changement qui varie d'un segment de consommatrices et de consommateurs à l'autre (tableau 1). À titre d'exemple, la préférence de consommation envers les VEB parmi le segment « Résistance » est de -40 000 $ en 2020, en supposant une valeur de base de -13 000 $, avec -20 000 $ selon des conditions pessimistes, et 0 $ en tant que valeurs optimistes en 2035.
7. L'augmentation mondiale exogène de la **variété de modèles** our les VER devrait passer de 10 % (par rapport à la disponibilité des modèles pour les véhicules conventionnels) en 2020, à 60 % (pessimistes) et 100 % (optimistes) en 2035.

41 Lutsey, N., Cui, H. & Yu, R. Evaluating electric vehicle costs and benefits in China in the 2020–2035 time frame. (International Council for Clean Transportation, 2021).

42 Fouquet, R. Trends in income and price elasticities of transport demand (1850–2010). Energy Policy 50, 62-71, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.001(2012).

43 Holmgren, J. Meta-analysis of public transport demand. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 41, 1021-1035, doi: https://doi.org/10.1016/j.tra.2007.06.003 (2007).

44 Jagannathan, R., Matsa, D. A., Meier, I. & Tarhan, V. Why do firms use high discount rates? *Journal of Financial Economics* 120, 445-463, doi: https://doi.org/10.1016/j.jfineco.2016.01.012 (2016).

45 Klier, T. & Linn, J. The Price of Gasoline and New Vehicle Fuel Economy: Evidence from Monthly Sales Data. *American Economic Journal: Economic Policy* 2, 134-153, doi:10.1257/pol.2.3.134 (2010).

8. **L'accès aux bornes de recharge** indique la disponibilité des infrastructures de recharge publique (fréquence ou densité des bornes de recharge) par rapport aux infrastructures existantes pour l'essence. La valeur est de 10 % en 2020 et suppose des valeurs de 60 % (conditions pessimistes), de 100 % (médianes) et de 100 % (optimistes) en 2035.
9. **La vitesse de réaction à l'échelle canadienne,** qui, dans le cadre du modèle *AUM*, détermine le taux auquel la technologie s'améliore au Canada, qui influe en partie (en plus des efforts mondiaux) la rapidité avec laquelle les coûts de production des véhicules au pays diminuent au fil du temps, en réponse à l'augmentation de la production au pays (apprentissage par la pratique) ou investissement national en R&D (apprentissage par la recherche) (voir l'équation 8 à des fins de consultation). Comme on suppose qu'une partie de la baisse du coût des véhicules est exogène (en raison de facteurs mondiaux), on peut comprendre cette vitesse de réaction comme la vitesse de réaction nationale. Le paramètre « Vitesse de réaction » suppose des valeurs de 6 % (scénario pessimiste) et de 10 % (scénario optimiste), +/- 25 % par rapport à la valeur médiane de 8 %.[46] Ces valeurs sont constantes entre 2020 et 2035. Le taux de renouvellement des stocks indique le taux exogène auquel les véhicules existants sont censés être retirés des routes chaque année. Nous supposons qu'entre 2020 et 2035, ce taux variera entre 5 % (pessimiste) et 10 % (optimiste).
10. **Le taux de renouvellement des stocks** indique le taux exogène auquel les véhicules existants sont censés être retirés des routes chaque année. Nous supposons qu'entre 2020 et 2035, ce taux variera entre 5 % (pessimiste) et 10 % (optimiste).
11. **L'élasticité de la demande des véhicules-kilomètres parcourus (VKP)** détermine la façon dont les déplacements des véhicules sont affectés par les coûts du carburant et suppose des valeurs de -0,15 (optimiste) et de -0,25 (pessimiste) entre 2020 et 2035.
12. **L'intensité des émissions de carbone de l'essence (en d'éq. gCO_2/MJ)** rend compte de la norme nationale sur les combustibles propres et suppose des valeurs de 76 g d'éq. CO_2/MJ (optimiste) et de 88 g d'éq. CO_2/MJ (pessimiste) en 2035 (tableau 4).

3.6 Processus de validation

Thies et coll. (2016) proposent des tests de validité pour s'assurer que la structure d'un modèle est une représentation adéquate du système du monde réel qu'il cherche à illustrer.[47] Pour valider notre modèle, nous respectons un processus de validation en six points qui est fondé sur les recommandations de Thies et coll. (2016). Ces critères sont :

1. La structure du modèle devrait suivre la structure générale des modèles de simulation existants du marché automobile, lorsque de tels modèles sont disponibles et appropriés.
2. TLes mécanismes utilisés dans le modèle (p. ex., apprentissage par la pratique, retombées de l'expérience, décisions d'achat) devraient s'appuyer sur des théories crédibles.
3. Les équations mettant en relation les variables du modèle devraient être cohérentes sur le plan dimensionnel.
4. Les limites du modèle et le niveau d'agrégation devraient permettre de répondre aux questions de recherche précises.
5. Dans la mesure du possible, les paramètres du modèle devraient s'appuyer sur des données empiriques.
6. Il convient de s'assurer que le modèle génère un comportement plausible et réaliste, de sorte que les résultats semblent logiques en fonction des données historiques et/ou d'une théorie du changement expliquant comment les choses pourraient être différentes dans le futur. En ce sens, des exercices de comparaison de modèles peuvent être utiles lors de l'élaboration de modèles, en aidant à calibrer et à valider les résultats de modèles et à cerner les faiblesses et les forces de différents types de modèles.

Nous suivons les recommandations ci-dessus dans le cadre de notre travail. Le tableau A1 de l'annexe décrit le rendement de notre modèle pour ces tests de validation.

46 Weiss, M. et al. On the electrification of road transport - Learning rates and price forecasts for hybrid-electric and battery-electric vehicles. *Energy Policy* 48, 374-393, doi: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.05.038 (2012)

47 Thies, C., Kieckhäfer, K. & Spengler, T. S. Market introduction strategies for alternative powertrains in long-range passenger cars under competition. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 45, 4-27, doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.05.002 (2016).

4. Scénarios de politiques

Notre analyse comprend un total de 12 scénarios.

Le premier est un scénario de « référence » comprenant uniquement les politiques actuelles. Ces politiques actuelles comprennent la tarification du carbone prévue (qui atteindra 170 $ la tonne en 2030), les normes d'émissions de GES des véhicules légers récemment annoncées par les États-Unis (les normes de l'*Environemental Protection Agency*), les normes sur les carburants faibles en carbone (la réglementation de la Colombie-Britannique et la norme sur les combustibles propres à l'échelle du Canada), le déploiement des bornes de recharge et divers incitatifs à l'achat. Ce scénario est décrit plus en détail à la section 4.1. Tous les autres scénarios de politiques comprennent au moins une politique supplémentaire qui se greffera à cette référence.

Nous simulons ensuite l'ajout de cinq politiques individuelles (une à la fois) : des normes d'émissions de GES des véhicules renforcés, trois versions d'une norme VZE et un programme de redevance-remise. Les normes d'émissions de GES des véhicules établissent les exigences (exprimées en g d'éq. CO_2/km) pour le niveau d'émissions de GES pouvant être rejeté par kilomètre par véhicule. Nous simulons un scénario rigoureux qui exige que les constructeurs automobiles diminuent le volume des émissions (et réduisent ainsi les besoins en énergie par kilomètre parcouru) des véhicules produits. Ces émissions doivent atteindre 40 g d'éq. CO_2/km d'ici 2035 (émissions d'échappement, et non pas celles dites « du puits à la roue »). Ce degré de rigueur nous semble à peu près suffisant pour pouvoir atteindre l'objectif de vente de VZE de 2035. Nous supposons qu'il n'y a pas de multiplicateurs pour les VZE, car ceux-ci devraient être éliminés progressivement d'ici 2022. Nous supposons également une amende de 10 $/g d'éq. CO_2 par véhicule si les émissions à l'échelle du parc sont supérieures aux exigences relatives aux normes sur les émissions des véhicules. Dans le cadre de ces normes, un VEB est considéré comme émettant 0 g d'éq. CO_2/km, tandis qu'un VHR est traité comme ayant 70 g d'éq. CO_2/km (ces données étant des estimations des émissions des véhicules).

La norme VZE obligent les constructeurs à vendre un certain pourcentage de VZE. Conformément aux objectifs de vente du Canada énoncés en 2021, nous simulons une norme VZE nationale ambitieuse qui exigerait que 50 % des ventes de véhicules neufs soient des VZE d'ici 2030 et 100 % d'ici 2035. Pour les trois versions de cette politique, nous supposons « un crédit accordé pour un VZE » (qui est actuellement en place en Colombie-Britannique) où un crédit est attribué à parts égales à tous les VZE; une pénalité en cas de non-conformité de 10 000 $ par crédit; et une allocation pour la mise en banque de crédits de conformité, lorsque les crédits excédentaires d'une année donnée peuvent être mis de côté afin de respecter la conformité dans les années à venir. Nous simulons trois versions d'une norme VZE, qui diffèrent dans la façon dont elles traitent les VHR et les VEB (ce qui correspond approximativement aux différentes versions d'une norme VZE qui sont en place ou qui font l'objet de discussions dans diverses régions) :

- La norme VZE « neutre » permet toute combinaison de VEB et de VHR ;
- La norme VZE « avec plafond sur les VHR » limite la part admissible de VHR aux exigences de la norme VZE à 50 % à compter de 2030 ;
- La norme VZE « limitée aux VEB » permet uniquement aux véhicules de type VEB d'être admissibles à la norme VZE à compter de 2030.

Le système de redevance-remise impose une taxe ou une redevance pour l'achat d'un véhicule conventionnel en fonction de son niveau d'émissions, et prévoit des subventions à l'achat d'un VZE. Bien que ce programme puisse être en mesure de s'autofinancer, dans le cadre de ce rapport, ce facteur est approximatif, puisque l'approche utilisée ne permet pas une parfaite exactitude. Nous choisissons un calendrier de redevances et remises suffisamment rigoureux pour atteindre les objectifs de vente de VZE pour 2030 et 2035 de manière approximative. La section 4.2 fournit le calendrier détaillé. De plus, les subventions à l'achat de VZE offertes par le gouvernement fédéral et les provinces seront entièrement retirées du scénario à compter de 2022, puisque l'on considère que le système de redevance-remise et toute combinaison de politiques incluant une redevance-remise les remplaceront.

Nous simulons également six combinaisons de politiques. Il s'agit de trois formes de norme VZE (+ Normes d'émissions de GES des véhicules, + Redevance-remise et + Normes d'émissions de GES des véhicules + Redevance-remise) et de trois politiques avec une norme VZE limitée aux VEB (+ Normes d'émissions de GES des véhicules, + Redevance-remise et + Normes d'émissions de GES des véhicules + Redevance-remise).

4.1 Détails du scénario de « référence »

Nous donnons ici plus de détails sur les politiques que nous modélisons dans le scénario de « référence ». Nous modéliserons les politiques actuelles comme suit :

1. **Tarification du carbone :** Conformément au plan national de tarification, la taxe carbone fédérale passera de 50 $ la tonne en 2020 à 170 $ en 2030.[48]
2. **Norme sur les combustibles propres nationale** est modélisée afin de réduire l'intensité des émissions de carbone (en g/MJ) des combustibles liquides de 13 % d'ici 2030, passant de 90,4 g/MJ à 81,0 g/MJ.
3. **Normes sur les carburants à faible teneur en carbone (*Low Carbon Fuel Standard, ou LCFS*) :** L'intensité des émissions de carbone des combustibles liquides en Colombie-Britannique est encore réduite par la LCFS de la province (pour les véhicules de cette province), en plus de la Norme sur les combustibles propres, de manière à atteindre un taux de 80,5 g/MJ d'ici 2030.
4. **Norme VZE :** Nous tenons compte des normes VZE existantes en Colombie-Britannique et au Québec comme suit (en date de septembre 2021) :
   - C.-B. : Les VZE représentent 10 % des ventes d'ici 2025, 30 % d'ici 2030, 65 % d'ici 2035 et 100 % d'ici 2040.[49]
   - Québec : Les VZE représentent 12,5 % des ventes d'ici 2025, 65 % d'ici 2030 et 100 % d'ici 2035.
5. **Incitatifs à l'achat :** Nous tenons compte de toutes les subventions fédérales et provinciales à l'achat de VZE en isolant celles offertes pour les VEB (tableau 5) et celles pour les VHR (tableau 6). Nous nous servons de l'ambition prévue dans chaque région en estimant la durée du programme de subventions en fonction des fonds annoncés. Nous incluons également une prolongation de quatre ans des subventions fédérales accordées aux VEB et aux VHR, conformément au programme du gouvernement libéral en septembre 2021. Il est à noter que, comme le modèle AUM est conçu pour représenter le Canada dans son ensemble (et non les provinces en particulier), les subventions à l'achat de VZE sont calculées à l'aide d'une moyenne pondérée en fonction des ventes au pays (comme le montrent les tableaux 5 et 6)..

48 La tarification du carbone fait augmenter le coût du carburant pour les individus, ce qui influence les décisions d'achat de véhicules, ainsi que le nombre de véhicules-kilomètres parcourus (VKP), tout en réduisant les ventes globales de véhicules neufs. Les décisions des constructeurs automobiles sont affectées indirectement, dans la mesure où elles influencent les décisions de consommation concernant les types de véhicules ou leur taille..

49 La Colombie-Britannique a annoncé qu'elle établirait une exigence de 90 % de ventes de VZE d'ici 2030 alors que la présente modélisation était déjà terminée. L'inclusion de cette nouvelle exigence ne changerait pas fondamentalement les résultats de l'analyse.

Tableau 5. Subventions de base pour les VEB

VEB	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027-30
Canada	5000$	5000$	5000$	5000$	5000$	5000$	5000$	
C.-B.	3000$	3000$	3000$	3000$	3000$			
QC	8000$	8000$	8000$	8000$	8000$	8000$	8000$	
N-É	3000$	3000$	3000$	3000$	3000$			
Î.-P.-É	3750$	3750$	3750$					
T.-N.-L.	2500$	2500$	2500$					
Yukon	4000$	4000$	4000$	4 000$				
Total pondéré en fonction des ventes	7425$	7425$	7425$	7364$	7347$	6938$	6938$	$0

Tableau 6. Subventions de base pour les VHR

VHR	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027-30
Canada	2500$	2500$	2500$	2500$	2500$	2500$	2500$	
C.-B.	1500$	1500$	1500$	1500$	1500$			
QC	4000$	4000$	4000$	4000$	4000$	4000$	4000$	
N-É	2000$	2000$	2000$	2000$	2000$			
Î.-P.-É	3750$	3750$	3750$					
T.-N.-L.	2500$	2500$	2500$					
Yukon	4000$	4000$	4000$	4000$	$4,000			
Total pondéré en fonction des ventes	3770$	3770$	3770$	3709$	3693$	3468$	3468$	0$

6. **Déploiement des infrastructures de recharge pour VZE :** Nous supposons que l'accès aux bornes de recharge des VHR et des VEB passera de 10 % en 2020 à 70 % pour les personnes en possession de véhicules légers d'ici 2030 (par rapport à l'accès aux stations d'essence, qui est de 100 %) et à 100 % des personnes ayant acheté une automobile d'ici 2035 (ce qui équivaut à l'infrastructure existante pour l'essence). Dans le scénario utilisant les paramètres pessimistes, l'accès à la recharge n'est accessible que pour 60 % des consommatrices et consommateurs d'ici 2035. À l'heure actuelle, le traitement de l'accès à la recharge ne distingue pas les bornes domestiques des bornes publiques (hors domicile). Nous supposons que l'accès au ravitaillement pour les véhicules à essence conventionnels est de 100 %.

7. **Normes sur les émissions de GES des véhicules légers :** Les normes d'émissions de GES du scénario dit « de référence » correspondent à celles annoncées par Biden aux États-Unis. Nous supposons qu'il n'y a pas de « multiplicateurs », car il est attendu que ceux-ci soient éliminés progressivement dans la version canadienne. L'échéancier est le suivant (les valeurs de 2026 sont constantes jusqu'à la fin de la période de modélisation, en 2035) :

- 22020 : 140 g d'éq. CO_2/km
- 2021 : 134 g d'éq. CO_2/km
- 2022 : 132 g d'éq. CO_2/km (diminution de 1,5 % par rapport à l'année précédente)
- 2023 : 119 g d'éq. CO_2/km (diminution de 10 % par rapport à l'année précédente)
- 2024 : 113 g d'éq. CO_2/km (diminution de 5 % par rapport à l'année précédente)
- 2025 : 107 g d'éq. CO_2/km (diminution de 5 % par rapport à l'année précédente)
- 2026-2035 : 102 g d'éq. CO_2/km (diminution de 5 % par rapport à l'année précédente)

4.2 Détails du système de redevance-remise

Nous avons établi une structure de redevance-remise qui permettrait d'atteindre l'objectif de vente de 100 % de VZE en 2035, tout en maintenant un taux permettant la neutralité fiscale du programme. Dans ce scénario, les redevances pour les véhicules conventionnels et hybrides augmentent chaque année d'environ 10 %, et les rabais pour les VHR et les VEB diminuent au même rythme (tableau 7). Lorsque nous modélisons ce scénario, nous supposons que d'autres subventions (le programme iVZE fédéral et les programmes provinciaux) n'en font pas partie

Bien que ce scénario soit presque capable de s'autofinancer lorsque la redevance-remise n'est modélisée qu'en combinaison avec les politiques de base, cette neutralité n'est pas atteinte dans les scénarios dans lesquels plusieurs politiques sont associées. En général, lorsque la redevance-remise s'ajoute à d'autres politiques énergétiques, cela a pour effet d'augmenter la nouvelle part de marché des VZE et d'entraîner un versement de subvention plus élevé que les redevances perçues par le gouvernement. Ce résultat découle de notre approche de modélisation et pourrait certainement être évité grâce à un programme de redevance-remise conçu pour rajuster les redevances et les subventions annuellement, afin d'atteindre la neutralité fiscale.

5. Résultats

Nous résumons les résultats donnés par notre modèle en présentant d'abord notre analyse de l'incertitude. Nous présentons ensuite les résultats quant à l'efficacité observée en matière de ventes de VZE et de réduction des émissions de GES dans les scénarios de politique, répartis en quatre groupes : politiques individuelles, variations de la norme VZE, combinaisons de politiques avec la norme VZE dite « neutre » et combinaisons de politiques comprenant uniquement une norme se limitant aux VEB. La dernière section résume les principales constatations propres à chaque scénario, ainsi que les coûts des politiques et les dépenses gouvernementales pour chacune d'elles.

5.1 Analyse de l'incertitude

Comme décrit à la section 3, une incertitude inhérente à cet exercice de modélisation existe - comme c'est le cas dans toute étude qui simule les ventes de véhicules sur une durée de plus d'une décennie. Nous tenons compte de l'incertitude en effectuant une analyse de sensibilité. Comme il est indiqué à la section 3.5, en ce qui concerne les paramètres clés, nous sélectionnons des valeurs médianes tirées de la littérature, ainsi que des valeurs « optimistes » et « pessimistes ». Ces termes sont choisis en fonction de la part de marché des VZE; les paramètres optimistes entraînent une augmentation de cette part de marché, tandis que des paramètres pessimistes la diminuent. Dans le cadre de l'analyse de sensibilité, nous déterminons un résultat clé (ou principaux résultats des modèles), pour ensuite calculer la manière dont ce résultat évolue lorsque des changements sont apportés dans chacun de ces paramètres incertains, un à la fois. Ce processus nous aide à cerner les principales incertitudes liées au modèle, facilitant l'interprétation des résultats obtenus tout en déterminant les pistes importantes pour les futures recherches.

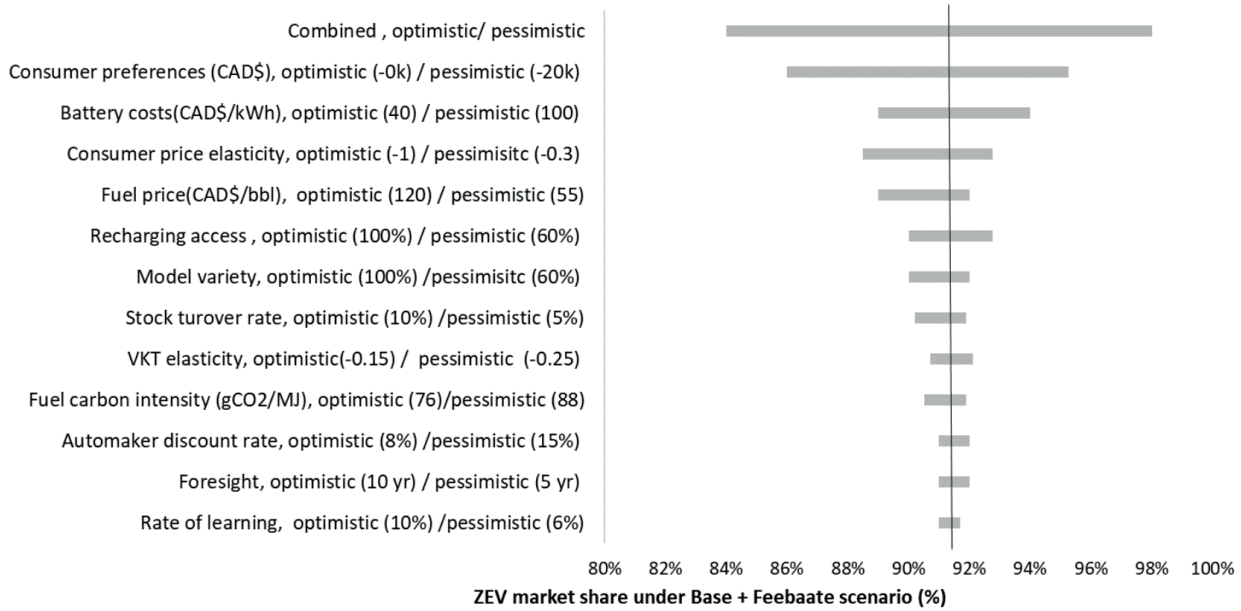
La figure 3 fournit un exemple représentatif qui a recours à la simulation médiane de la part de marché des VZE en 2035, à l'aide d'un scénario de politique en particulier : « Référence + Redevance-remise » Alors que le scénario médian simule une part de marché de 92 %, la combinaison de paramètres optimistes mène à une part de marché pour les VZE de 98 %, et la combinaison de paramètres pessimistes réduit la part de marché à 84 %. La figure 2

Table 7. Structure des subventions et des redevances concernant le système de redevance-remise (pratiquement autofinancé)

Catégorie de véhicule	Transmission	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Voiture compacte	VC	1 149 $	1 264 $	1 390 $	1 529 $	1 682 $	1 851 $	2 036 $	2 240 $	2 464 $	2 701 $	2 981 $	3 279 $	3 607 $	3 968 $
	Hybride	710 $	789 $	876 $	974 $	1 082 $	1 202 $	1 336 $	1 484 $	1 649 $	1 832 $	2 036 $	2 262 $	2 436 $	2 997 $
	VHR	-7 024 $	-6 386 $	-5 805 $	-5 277 $	-4 798 $	-4 361 $	-3 965 $	-3 604 $	-3 277 $	-2 979 $	-2 708 $	-2 474 $	-2 238 $	-2 034 $
	VEB	-13 636 $	-12 396 $	-11 269 $	-10 245 $	-9 513 $	-8 467 $	-7 697 $	-6 997 $	-6 361 $	-5 783 $	-5 257 $	-4 776 $	-4 344 $	-3 949 $
Berline	VC	1 573 $	1 730 $	1 903 $	2 096 $	2 303 $	2 533 $	2 786 $	3 065 $	3 371 $	3 709 $	4 079 $	4 487 $	4 936 $	5 430 $
	Hybride	1 149 $	1 264 $	1 390 $	1 529 $	1 682 $	1 851 $	2 036 $	2 240 $	2 464 $	2 710 $	2 981 $	3 379 $	3 797 $	3 968 $
	VHR	-7 024 $	-6 386 $	-5 805 $	-5 277 $	-4 798 $	-4 361 $	-3 965 $	-3 604 $	-3 277 $	-2 979 $	-2 708 $	-2 474 $	-2 238 $	-2 034 $
	VEB	-13 636 $	-12 396 $	-11 269 $	-10 245 $	-9 513 $	-8 467 $	-7 697 $	-6 997 $	-6 361 $	-5 783 $	-5 257 $	-4 776 $	-4 344 $	-3 949 $
VUS (fourgonnette/ camion)	VC	1 815 $	1 996 $	2 196 $	2 415 $	2 657 $	2 923 $	3 215 $	3 536 $	3 890 $	4 279 $	4 707 $	5 178 $	5 696 $	6 265 $
	Hybride	1 210 $	1 331 $	1 464 $	1 610 $	1 771 $	1 948 $	2 143 $	2 357 $	2 593 $	2 853 $	3 138 $	3 452 $	3 815 $	4 177 $
	VHR	-7 024 $	-6 386 $	-5 805 $	-5 277 $	-4 798 $	-4 361 $	-3 965 $	-3 604 $	-3 277 $	-2 979 $	-2 708 $	-2 474 $	-2 238 $	-2 034 $
	VEB	-13 636 $	-12 396 $	-11 269 $	-10 245 $	-9 513 $	-8 467 $	-7 697 $	-6 997 $	-6 361 $	-5 783 $	-5 257 $	-4 776 $	-4 344 $	-3 949 $
Camionnette	VC	4 840 $	5 324 $	5 856 $	6 442 $	7 086 $	7 794 $	8 574 $	9 431 $	10 387 $	11 412 $	12 353 $	13 809 $	15 190 $	16 708 $
	Hybride	2 420 $	2 620 $	2 934 $	3 221 $	3 453 $	3 897 $	4 287 $	4 715 $	5 187 $	5 706 $	6 276 $	6 904 $	7 595 $	8 354 $
	VHR	-7 024 $	-6 386 $	-5 805 $	-5 277 $	-4 798 $	-4 361 $	-3 965 $	-3 604 $	-3 277 $	-2 979 $	-2 708 $	-2 474 $	-2 238 $	-2 034 $
	VEB	-13 636 $	-12 396 $	-11 269 $	-10 245 $	-9 513 $	-8 467 $	-7 697 $	-6 997 $	-6 361 $	-5 783 $	-5 257 $	-4 776 $	-4 344 $	-3 949 $

est connue sous le nom de « diagramme en tornade », car elle commence par les paramètres les plus sensibles en haut, et se déplace vers le bas. Les lignes horizontales représentent les paramètres pour lesquels la sortie du modèle est moins sensible.

Figure 3. Analyse de sensibilité (part de marché des VZE en 2035, « Référence + Système de redevance-remise »)



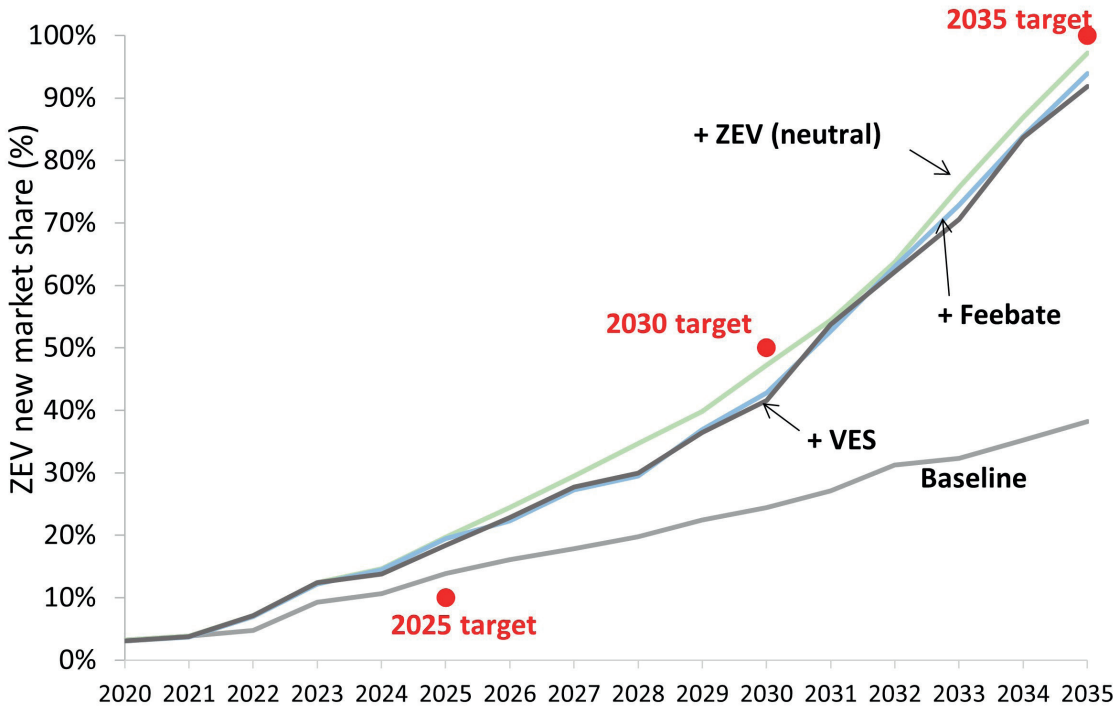
Les résultats les plus sensibles sont les préférences de consommation, que nous mesurons comme un changement dans la façon dont les consommatrices et les consommateurs du segment « Résistance » évaluent les VEB (l'ASC dans l'équation 1) en 2035. Le seul fait de modifier ce paramètre peut faire passer la part de marché pour les VZE de 86 % à 95 % en 2035. Le deuxième paramètre possédant le plus d'influence est le coût des batteries en 2035 (faisant passer la part de marché de 89 % à 94 %), suivi de l'élasticité des prix à la consommation pour les ventes de véhicules (89 % à 93 %), du prix du carburant (89 % à 92 %) et de l'accès à la recharge en 2035 (90 % à 93 %).

Dans les sous-sections suivantes, nous soulignons de nouveau cette incertitude grâce à la fourchette des résultats dépeints dans des figures illustrant la part de marché des VZE ainsi que les émissions de GES. Les courbes élevées pour la part de marché des VZE (et les lignes faibles pour les émissions de GES) représentent les 12 variables incertaines dans leur contexte « optimistes », tandis que les courbes basses représentant la part de marché des VZE (et les courbes élevées pour les émissions de GES) découlent de paramètres « pessimistes ».

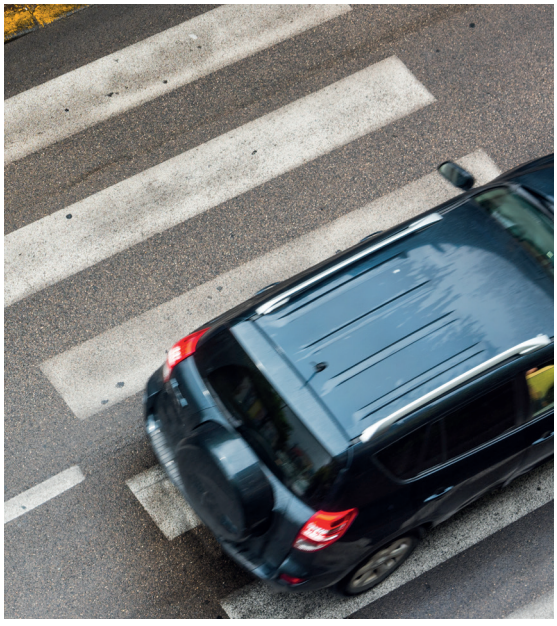
5.2 Comparaison des politiques individuelles (norme VZE neutre, normes d'émissions de GES des véhicules et système de redevance-remise)

La section présente les résultats des scénarios de référence et des scénarios individuels de politique. La figure 4 illustre la nouvelle part de marché des VZE au fil du temps (y compris les VEB et les VHR, comme le présent rapport le démontre) pour les niveaux médians des paramètres. Selon le scénario de politique de référence, la simulation médiane des ventes de VZE est de 24 % en 2030 (bien en deçà de la cible de 50 %) et de 38 % en 2035 (bien en deçà de la cible de 100 %).

Figure 4. Part de marché pour les VZE dans les ventes de véhicules neufs (politiques individuelles, cas médian)



En revanche, chacun des trois scénarios de politique (norme VZE neutre, normes d'émissions de GES des véhicules et système de redevance-remise) se rapproche de l'atteinte des objectifs de vente de 2030 et de 2035, bien qu'ils soient tous en deçà des deux cibles de deux à huit points de pourcentage dans le scénario médian. La légère insuffisance des résultats obtenus par le système de redevance-remise et les normes d'émissions de GES des véhicules sont attribuables à la conception de scénarios — des normes sur les émissions de GES des véhicules ou un programme de redevance-remise démontrant plus de rigueur (redevances et subventions plus élevées) pourraient faire progresser la part du marché vers l'atteinte de l'objectif.



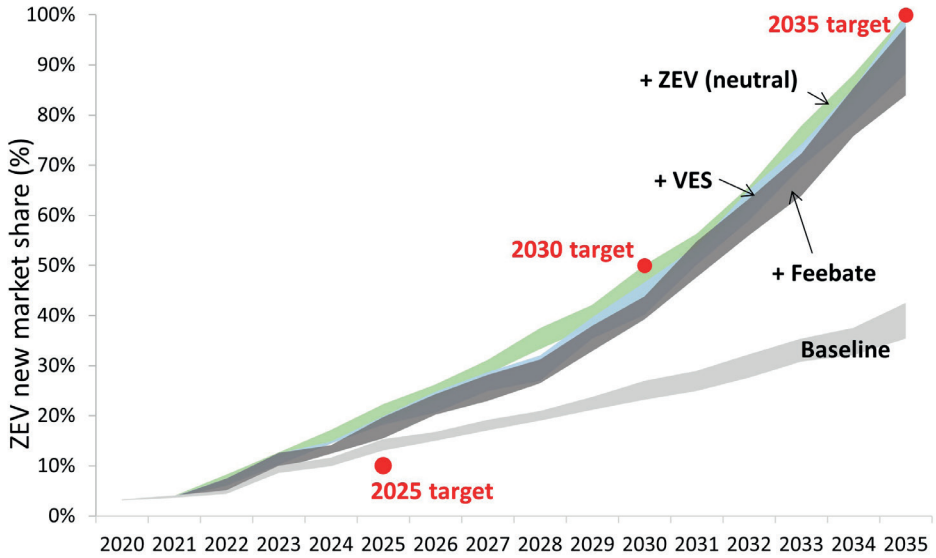
La norme VZE neutre constitue la seule politique visant à inciter les constructeurs automobiles à se conformer aux objectifs de vente des VZE (comportant des pénalités en cas de non-conformité). Ce scénario peut être en deçà des objectifs d'environ trois points de pourcentage pour deux raisons : i) les

constructeurs accumulent des crédits en raison d'une « surconformité » excessive pendant les années précédentes, pour pouvoir se conformer aux exigences de 2030 et de 2035, ou ii) les constructeurs choisissent de payer une pénalité de 10 000 $ par pour chaque véhicule ne se conformant pas aux normes, car cela est plus économique que de subventionner davantage leurs VZE (ou de se conformer autrement aux exigences), afin d'atteindre le montant nécessaire pour atteindre le pourcentage restant du marché.

Dans ce cas, la majeure partie des répercussions provient de la non-conformité. En raison de l'hétérogénéité des préférences des consommatrices et consommateurs, il est difficile de vendre des VZE à une petite quantité de gens appartenant à la catégorie « Résistance » (voir la section 3.1). Bien que les constructeurs automobiles puissent augmenter le prix des véhicules conventionnels, une hausse excessive du prix réduira les ventes globales de véhicules et les profits. Les constructeurs évaluent le compromis à faire entre le renoncement à des profits en raison des ventes perdues et des amendes à payer, ou le choix de payer des amendes pour une petite partie des ventes non conformes aux exigences de la réglementation.

La figure 5 présente les mêmes scénarios, avec des zones ombrées représentant l'incertitude des résultats de la simulation (avec des courbes supérieures utilisant des niveaux de paramètres optimistes, et des courbes inférieures, des niveaux pessimistes). Notons qu'il peut être fondamentalement difficile de représenter l'incertitude avec un chevauchement important, bien que ces chiffres fournissent tout de même une idée des fourchettes et des chevauchements existants entre les politiques.

Figure 5. Part de marché pour les VZE dans les ventes de véhicules neufs (politiques individuelles, fourchette d'incertitude)



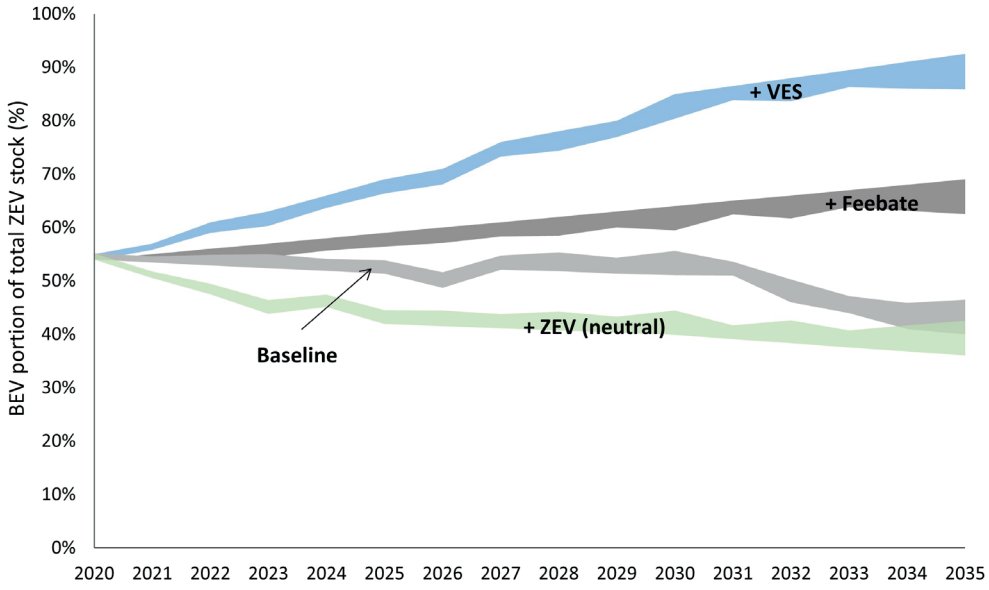
démontre que les politiques du scénario de référence ne sont pas du tout à la hauteur des objectifs de vente des VZE (même dans des conditions optimistes, la part de marché pour les VZE pour 2035 ne dépasse pas 43 %). Encore une fois, nous constatons que les trois politiques individuelles se rapprochent des cibles à atteindre. L'atteinte complète des objectifs de vente de VZE n'est possible que dans des conditions optimistes, dans certains cas : la norme VZE permet d'atteindret les cibles de 2030 et de 2035, et les normes sur les émissions des véhicules permettent d'atteindre la cible de 2035.

En comparant les étendues de l'incertitude pour chaque politique, la norme VZE génère des résultats relativement plus précis et plus certains en 2035 (de 96 % à 100 %), tandis que la redevance-remise s'accompagne de la plus grande fourchette d'incertitude (de 84 % à 98 %). C'est pour cette raison que l'analyse de l'incertitude à la section 5.1 porte sur le scénario incluant la redevance-remise. La certitude relative de chaque scénario (la taille de l'étendue) peut également intéresser les responsables politiques, puisqu'une étendue plus étroite (ou un résultat

plus certain) qui est plus proche de la cible est plus souhaitable qu'un nombre plus élevé (ou un résultat moins certain).

La figure 6 présente la proportion de VEB dans les ventes totales de VZE chaque année pour les différents scénarios à l'étude. Selon le scénario de référence, les VEB représentent un peu plus de 50 % des ventes totales de VZE au cours de la première décennie (51 % à 56 %), mais cette part tombe à 40 % à 47 % après 2030. Cette situation est en grande partie attribuable à l'élimination des subventions fédérales et provinciales qui favorisent la vente de VEB (section 4.1), et à nos hypothèses médianes selon lesquelles les VHR constitueront le type de véhicule préféré pour une majorité de personnes au Canada jusqu'en 2035. En revanche, la nature même du système de redevance-remise et des normes d'émissions de GES des véhicules fait en sorte que les ventes de VEB augmentent au fil du temps. Le système de redevance-remise permet d'accélérer la démocratisation des VEB au fil du temps. De son côté, le renforcement des normes d'émissions de GES des véhicules accorde davantage de crédits aux VEB (qui sont cotés 0 g d'éq. CO_2/km) pour pouvoir atteindre des normes de plus en plus élevées concernant les émissions des parcs de véhicules (< 40 g/km en 2035).

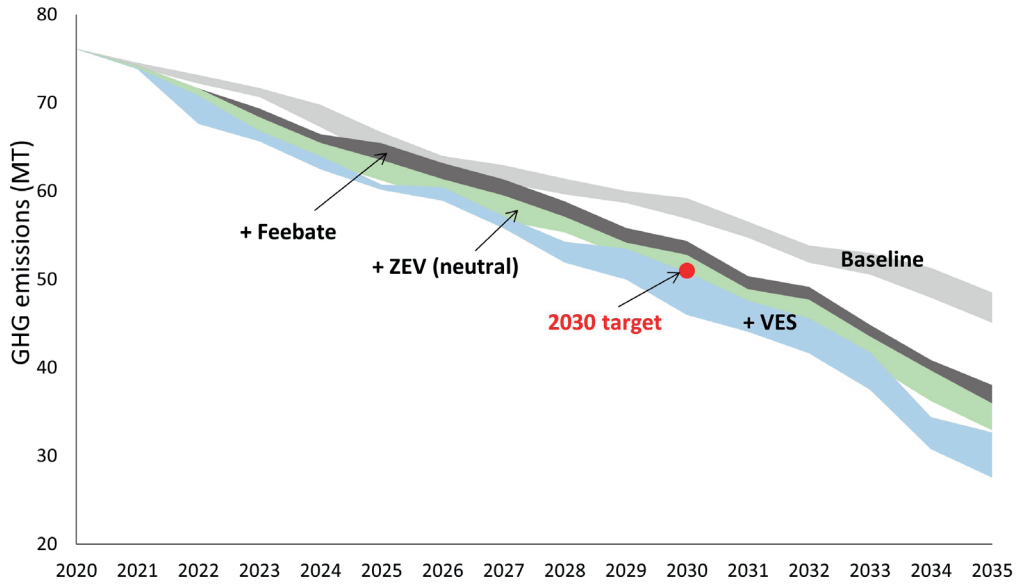
Figure 6. Percentage of BEVs in ZEV sales for each sales year (individual policies, uncertainty range)



La proportion de VEB est la plus faible en vertu de la norme VZE, atteignant 36 % à 43 % en 2035. Cela s'explique par le fait que cette version de la norme VZE fournit des crédits égaux pour les VHR et les VEB, sans plafond pour les VHR. Les préférences de consommation sont généralement plus élevées en ce qui concerne les VHR (comme cela est résumé à la section 3.1), de sorte que les constructeurs automobiles trouvent moins coûteux de vendre plus de VHR que de VEB. La section suivante explore la façon dont ces résultats changent avec les variations dans la conception de la norme VZE.

La figure 7 illustre les émissions totales de GES de 2020 à 2035 provenant du parc de véhicules légers, selon chaque scénario de politique. Pour commencer, le scénario de référence affiche des nombres inférieurs de 6 à 9 Mt par rapport à l'objectif présumé de 51 Mt pour 2030 (40 % en dessous des niveaux de 2005) — même dans des conditions optimistes. Les trois scénarios touchent à la cible dans leur fourchette d'incertitude : 51 à 53 Mt pour la norme VZE, 46 à 51 Mt pour les normes d'émissions de GES des véhicules et 48 à 54 Mt pour le système de redevance-remise.

Figure 7. Émissions de GES émis par les véhicules légers (politiques individuelles, fourchette d'incertitude).



Remarque : Par souci de clarté, l'axe des Y est tronqué à 20 Mt.

Dans les conditions que nous avons choisies pour ces simulations, le renforcement des normes d'émissions de GES des véhicules prévoit des réductions de GES beaucoup plus importantes en 2035 que le système de redevance-remise ou la norme VZE. Les différences dans les répercussions sur les émissions de GES correspondent en grande partie i) aux ventes totales de VZE jusqu'à ce point, et ii) aux différences dans la proportion de VEB au sein de ces ventes de VZE (voir la figure 6). À cet égard, la mise en place de normes d'émissions des véhicules permet d'atteindre de meilleurs résultats qu'une norme VZE, car les VHR représentent une plus grande proportion des ventes totales dans le cadre de la norme VZE. Bien que la redevance-remise offre la possibilité d'une proportion plus élevée de VEB que la norme VZE, elle génère également moins de ventes de VZE, ce qui entraîne une réduction légèrement moindre d'émissions de GES selon les hypothèses médianes du scénario.

5.3 Comparaison des différentes normes VZE

La présente section résume les résultats des trois versions de la norme VZE, à savoir une norme VZE dite « neutre » par rapport aux VHR et aux VEB (voir la section précédente), une deuxième qui instaure un plafond sur les VHR à 50 % dans la part de marché des VZE à compter de 2030 (« norme avec plafond sur les VHR »), et une troisième qui n'admet que les VEB à partir de 2030 (« norme limitée aux VEB »). Les trois normes VZE possèdent des trajectoires de ventes de VZE semblables en ce qui concerne leur scénario médian (figure 8), et des fourchettes d'incertitude identiques, se situant entre 96 % à 100 % pour les ventes de 2035 (figure 9).

Figure 8. Part de marché de VZE dans les ventes de véhicules neufs (variations des normes VZE, cas médian)

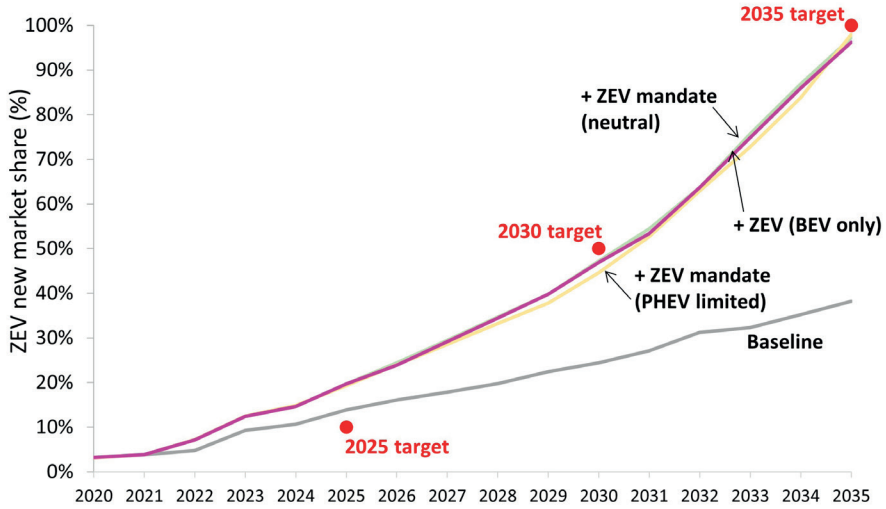
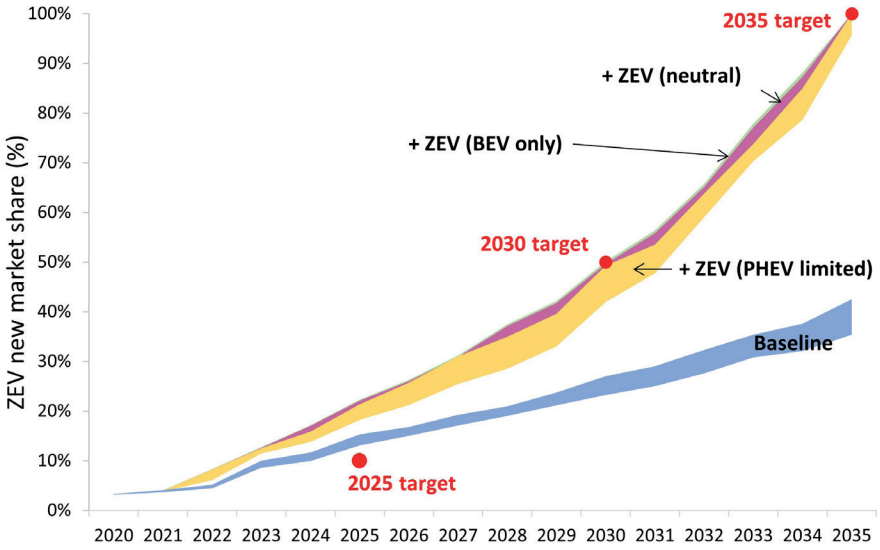
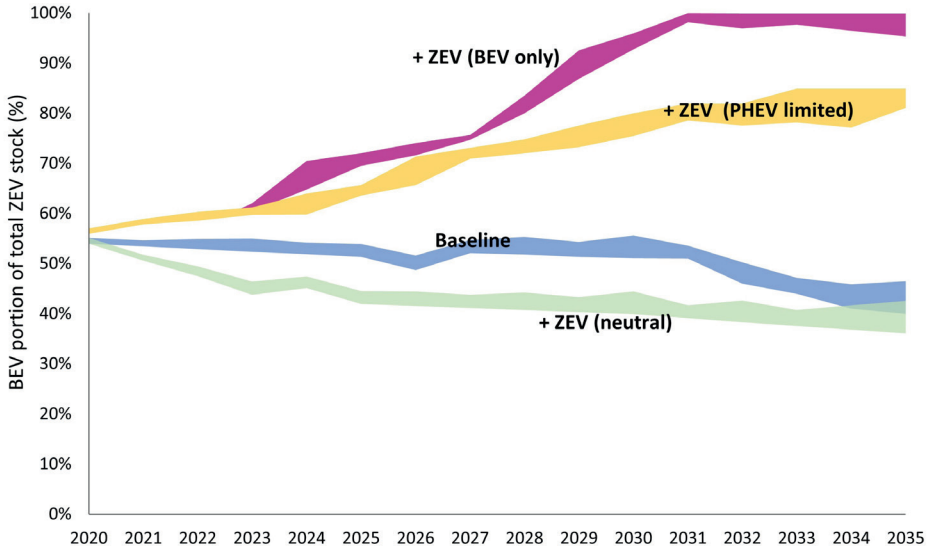


Figure 9. Part de marché pour les VZE dans les ventes de véhicules neufs (normes VZE, fourchette d'incertitude)



La figure 10 illustre la principale différence entre les modèles de norme VZE : la trajectoire de la part de ventes des VEB au sein des ventes de VZE. Comme le montre déjà la section 5.2, la norme VZE neutre fait en sorte que de 36 à 43 % des VZE vendus en 2035 seront des VEB. La part de la norme avec plafond sur les VHR augmente graduellement pour atteindre plus de 80 % des ventes de VZE en 2035. Enfin, la norme se limitant aux VEB tend vers 100 %, mais dans les cas les plus pessimistes, la part des VEB vendus en 2035 sera de 95 % (ce qui signifie que certains VHR sont vendus, même s'ils n'obtiennent pas de crédit dans le cadre de la norme VZE).

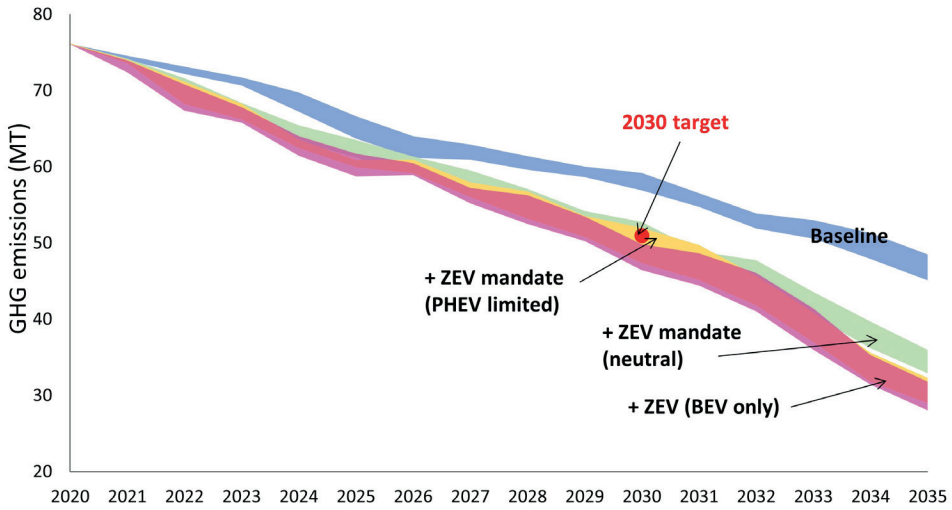
Figure 10. Pourcentage de VEB vendus dans les ventes totales de VZE pour chaque année de vente (variations des normes VZE, fourchette d'incertitude)



« surconformité » des constructeurs automobiles à la norme VZE dépend largement d'une prévision parfaite (jusqu'en 2035). En général, les consommatrices et les consommateurs préfèrent davantage les VHR, comme dans le scénario de référence. Cependant, lorsque les VEB auront atteint le seuil d'environ 60 % de part de marché (sur le total des VZE), on verra s'améliorer fortement les préférences des consommatrices et des consommateurs pour les VEB. Comme le prix des VEB est déjà plus bas que celui des VHR depuis la fin de 2020, les préférences plus marquées pour les VEB en font un choix privilégié pour un nombre croissant d'individus. Étant donné que le constructeur modèle bénéficie de cette perspective (qui n'est peut-être pas disponible dans le monde réel), il proposera plus rapidement une offre de VEB accrus, soit dès 2021, de sorte qu'en raison de l'apprentissage endogène dans le modèle, les préférences pour les VEB augmenteront pour atteindre un niveau comparable à celui des VHR d'ici 2030. À ce stade-là, une proportion importante de consommatrices et de consommateurs vont acheter des VEB même sans bénéficier de subvention de prix croisés, ce qui mènera à une conformité supérieure aux exigences de la norme.

La figure 11 traduit ces résultats en réductions des émissions de GES. Les trois versions de la norme VZE peuvent atteindre la cible d'émissions de GES prévue pour 2030 et continuer à surpasser le scénario de référence en 2035. À cette date, la norme VZE avec plafond sur les VHR et celle limitée aux VEB ont des répercussions semblables sur les émissions de GES, et les deux génèrent plus de réductions que la norme VZE neutre. Comme nous l'avons expliqué plus tôt, les politiques favorisant une plus grande utilisation des VEB entraînent une plus grande réduction des émissions de GES (tous les autres paramètres demeurent constants).

Figure 11. Réduction des émissions de GES des véhicules légers (variations de la norme VZE, fourchette d'incertitude)



Remarque : Par souci de clarté, l'axe des Y est tronqué à 20 Mt.

5.4 Comparaison des combinaisons de politiques (avec norme VZE neutre)

Pour faciliter la comparaison entre les différentes combinaisons de politiques, nous avons divisé ces dernières entre celles possédant une norme VZE neutre, comme le montre cette section, et celles qui ont une norme VZE limitée aux VEB, comme le montre la section suivante.

Les figures 12 et 13 montrent l'impact sur la part de marché des VZE d'une norme VZE dite « neutre » combinée à une redevance-remise, à des normes d'émissions de GES renforcées et à un système de redevance-remise et des normes d'émissions de GES renforcées. L'ajout de politiques à la combinaison entraîne généralement une hausse des ventes de VZE (en particulier de 2028 à 2034), et chaque combinaison dépasse les objectifs de vente de 2030 (même dans des conditions pessimistes). Il est intéressant de noter que ces impacts entraînent une trop grande conformité avec une norme VZE au cours des premières années, ce qui est encore une fois motivé par la stratégie du fabricant automobile (pouvant prédire parfaitement l'avenir). Celui-ci vise à faire croître les préférences pour les VZE et à obtenir une majoration complète pour les VZE dans les années à venir. Les combinaisons de politiques permettent d'atteindre la cible de 100 % avec des niveaux élevés de certitude et une part de marché de plus de 97 %, même dans des scénarios pessimistes.

Si l'on observe les combinaisons, des normes d'émissions de GES des véhicules plus strictes conduisent à une augmentation des ventes plus importante que la mise en œuvre d'un système de redevance-remise. La combinaison des trois politiques, une norme VZE, des normes d'émissions de GES accrues et un système de redevance-remise, n'a pas beaucoup plus d'impact que la combinaison d'une norme VZE et des normes d'émissions de GES plus strictes.

Figure 12. Part de marché de VZE dans les ventes de véhicules neufs (combinaisons de politiques avec norme VZE neutre, cas médian)

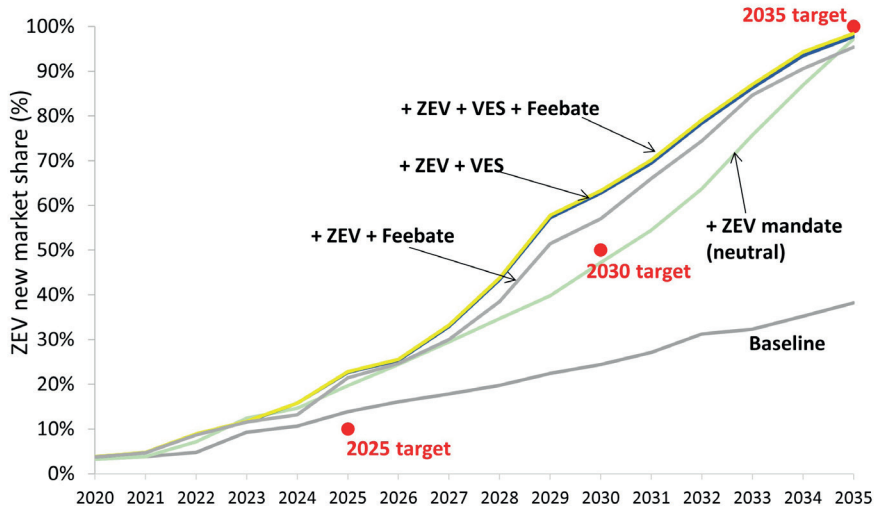
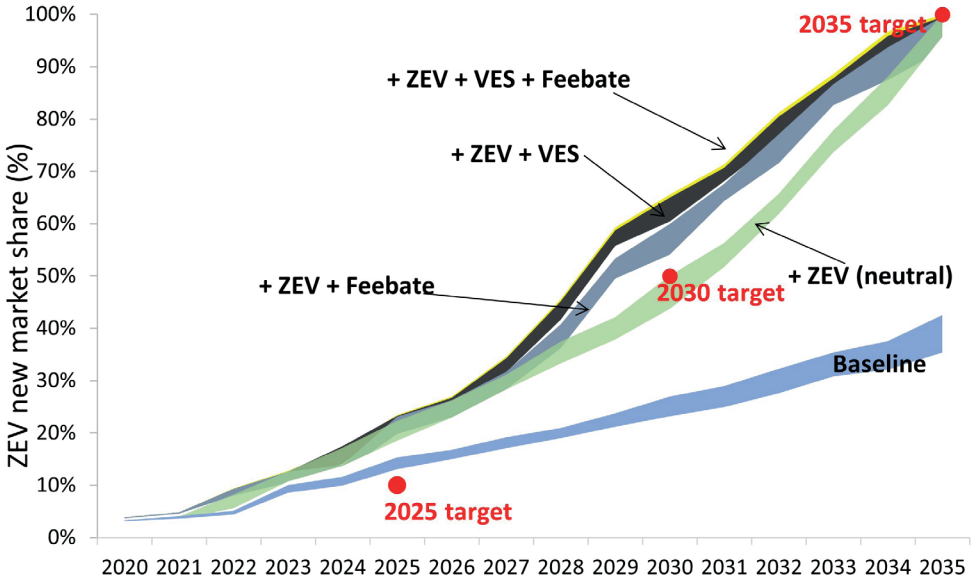
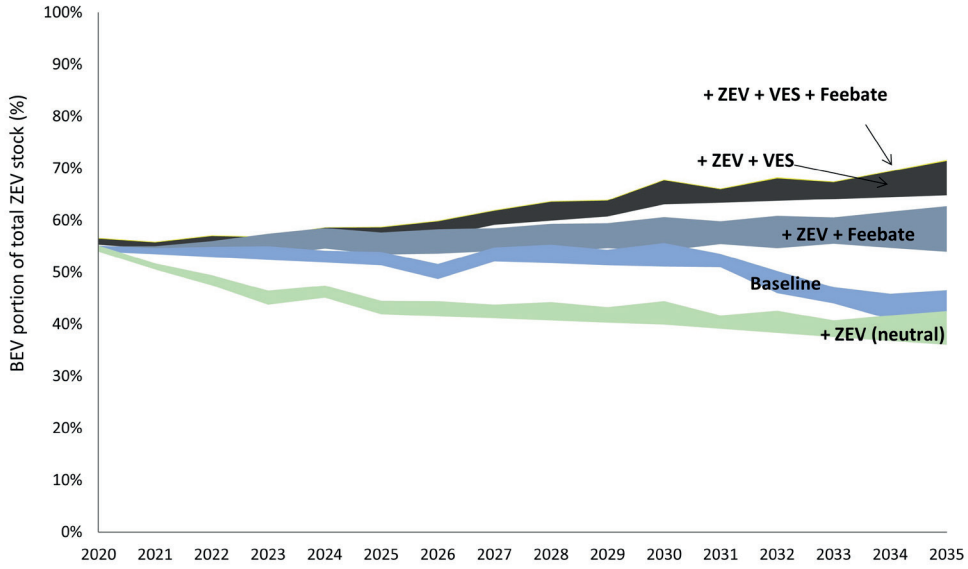


Figure 13. Part de marché des VZE dans les ventes de véhicules neufs (combinaison de politiques avec une norme VZE neutre, fourchette d'incertitude)



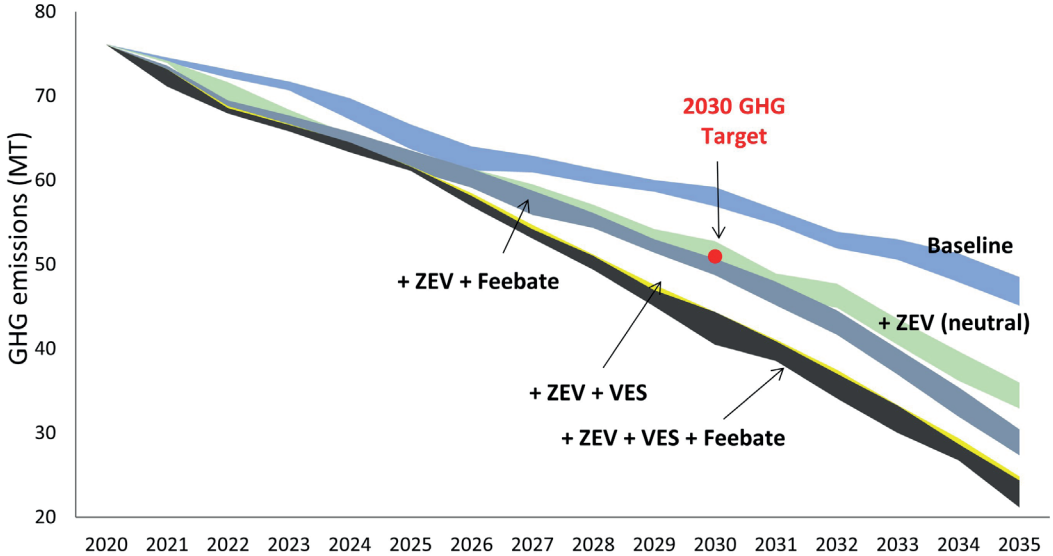
Étant donné que les normes d'émissions de GES renforcées et le système de redevance-remise favorisent les VEB par rapport aux VHR (comme nous l'avons décrit plus tôt), leur inclusion dans une combinaison de politiques se traduit par une proportion plus élevée de VEB vendus que la norme VZE neutre uniquement (figure 14).

Figure 14. Pourcentage de VEB vendus parmi les ventes totales de VZE neufs pour chaque année de vente (combinaison de politiques avec norme VZE neutre, fourchette d'incertitude)



Enfin, la figure 15 illustre l'efficacité des combinaisons de politiques pour diminuer les émissions de GES. L'ajout d'autres politiques à la norme VZE neutre entraîne des améliorations importantes en 2030 et en 2035 en matière d'atténuation des émissions de GES. Bien que l'ajout d'un système de redevance-remise aide à réduire les émissions de GES, le renforcement des normes d'émissions de GES a beaucoup plus d'impact sur les émissions de GES. Comme prévu, les combinaisons de politiques s'avèrent plus efficaces pour réduire les émissions de GES que les politiques seules.

Figure 15. Réduction des émissions de GES provenant des véhicules légers (combinaison de politiques avec norme VZE neutre, fourchette d'incertitude)



Remarque : Par souci de clarté, l'axe des Y est tronqué à 20 Mt.

5.5 Comparaison des combinaisons de politiques (avec norme limité aux VEB)

Le dernier ensemble de combinaisons de politiques porte sur la norme limitée aux VEB à partir de 2030. Les résultats correspondent en grande partie à ceux de la section précédente (figures 16 et 17). L'ajout de politiques à la norme limitée aux VEB a pour effet i) d'accroître la part de marché des VZE, ii) d'engendrer une conformité excessive des constructeurs vers 2030, iii) d'avoir un plus grand impact sur les ventes grâce à l'ajout de normes d'émissions de GES renforcées par rapport au système de redevance-remise, et iv) de réduire les fourchettes d'incertitude et, par conséquent, d'accroître la certitude d'atteindre les objectifs de vente de VZE pour 2035.

Figure 16. Part de marché de VZE dans les ventes de véhicules neufs (combinaisons de politiques avec norme VZE limitée aux VEB, cas médian)

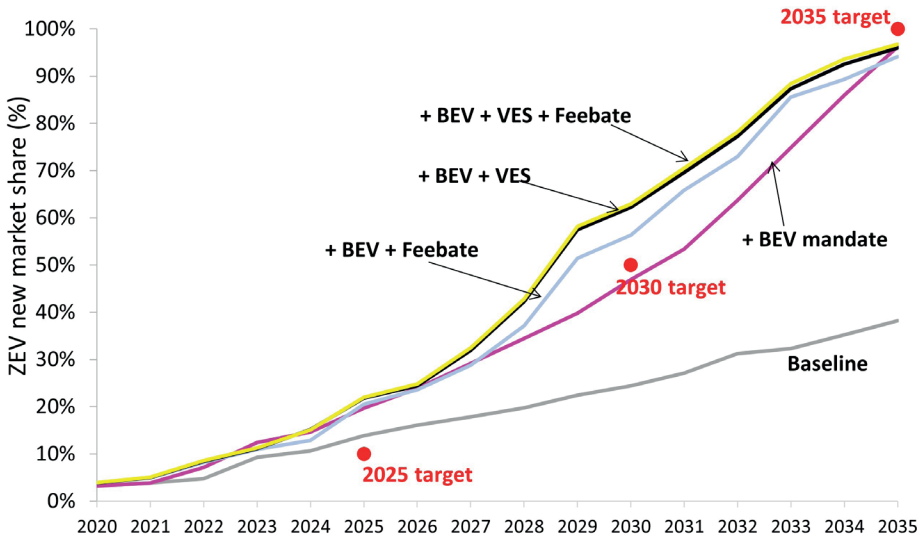
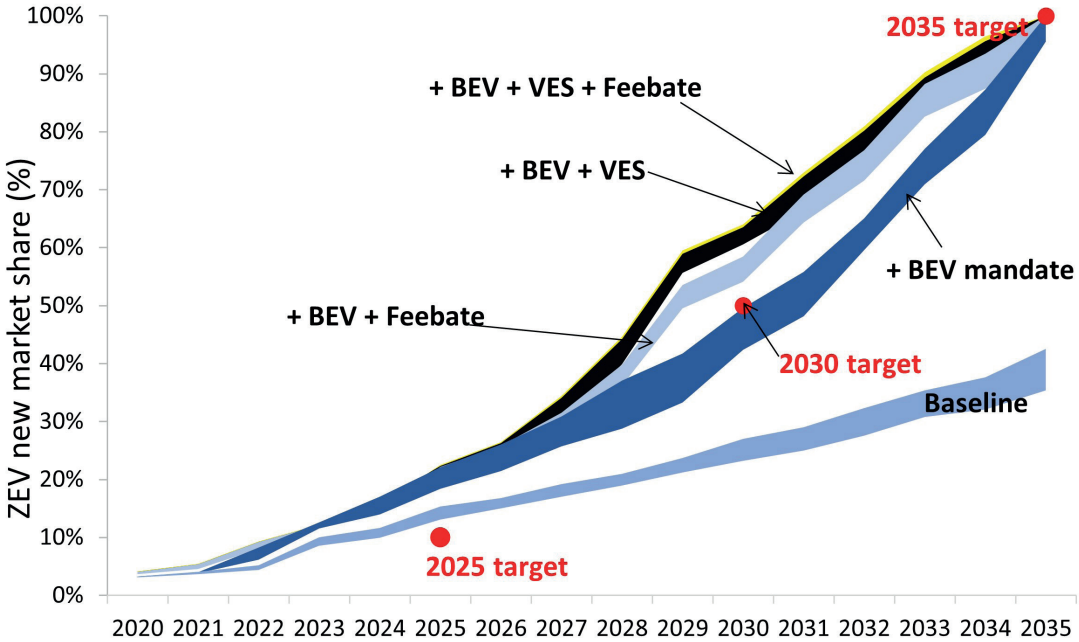
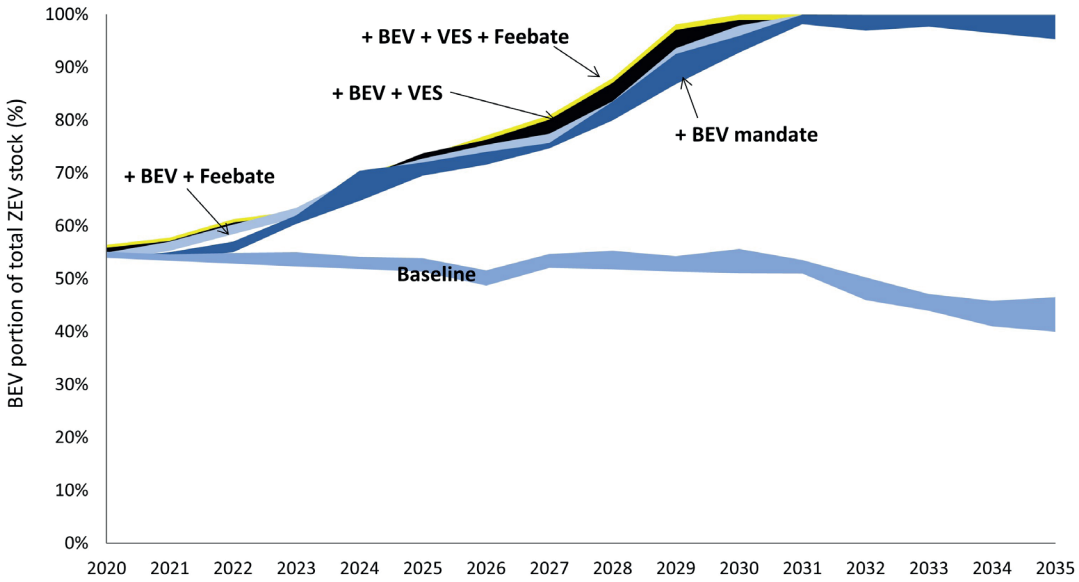


Figure 17. PPart de marché pour les VZE dans les ventes de véhicules neufs (combinaison de politiques avec norme VZE limitée aux VEB, fourchette d'incertitude)



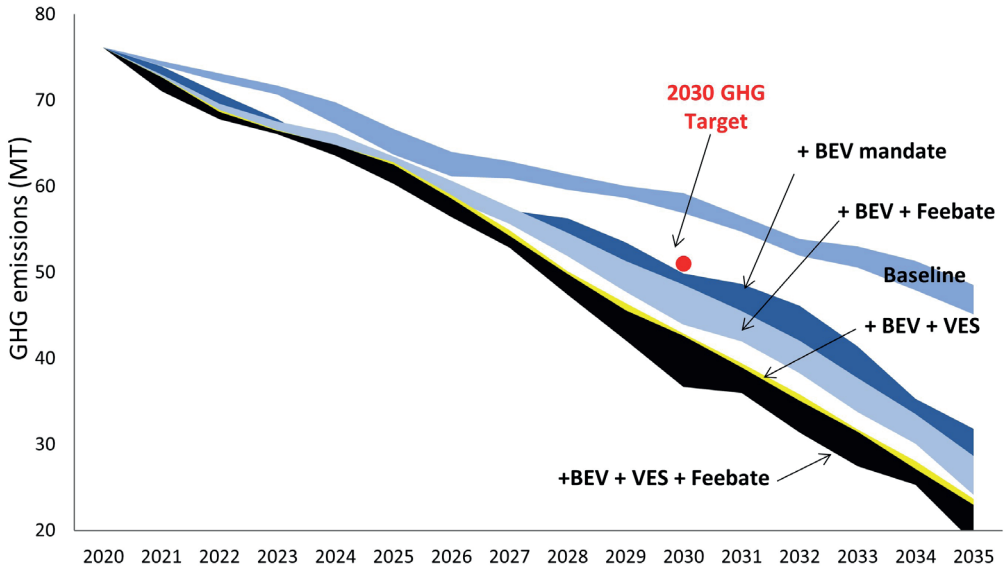
Peu de variations sont constatées dans la part de VEB vendus entre ces différents scénarios, car tous comprennent une norme limitée aux VEB (figure 18), bien que l'ajout d'une ou deux politique(s) entraîne une augmentation légèrement plus rapide de la part de marché des VEB.

Figure 18. Pourcentage de VEB vendus parmi les ventes totales de VZE pour chaque année de vente (combinaison de politiques avec norme VZE limitée aux VEB, fourchette d'incertitude)



Comme pour les combinaisons de politiques incluant une norme VZE neutre, les combinaisons avec la norme limité aux VEB entraînent des améliorations progressives en 2030 et en 2035 en matière de réduction des émissions de GES (figure 19). Les scénarios « VEB + Normes d'émissions de GES des véhicules » et « VEB + Normes d'émissions de GES des véhicules + Redevance-remise » entraînent la plus grande réduction parmi tous les scénarios simulés dans cette étude.

Figure 19. éduction des émissions de GES provenant des véhicules légers (combinaison de politiques avec norme VZE limitée aux VEB, fourchette d'incertitude)



Remarque : Par souci de clarté, l'axe des Y est tronqué à 20 Mt.

Table 8. Sommaire des scénarios, y compris les coûts liés à la politique (2035, scénario médian)

	Nouvelle part de marché des VZE 2035 (%)	Émissions de GES 2035 (MT)	Répercussions sur les profits 2020-2035 (%)	Répercussions sur la rente de consommation 2020-2035 (%)	Total des coûts privés ($/tonne, 8%)	Total des coûts privés ($CA/tonne, 3%)	Total des dépenses gouvernementales (milliards de $, non actualisés)
Référence	38,3	46,8	0	0	0	0	2,5
Politiques individuelles							
+ Norme VZE (neutre)	98,7	34,9	-6,8	-3,9	268	478	3,4
+ Normes d'émissions de GES renforcées	93,2	31,8	-7,6	-4,8	283	496	4,0
+ Système de redevance-remise	91,4	36,8	-8,4	-3,3	286	501	0,4
Variations de la norme VZE							
+ Norme VZE (neutre)	98,7	34,9	-6,8	-3,9	268	478	3,4
+ Norme VZE avec plafond sur les VHR (<50%) à partir de 2030	98,1	32,2	-7,7	-5,1	277	487	3,7
+ Norme VZE limitée aux VEB à partir de 2030	98,3	31,4	-8,1	-6,3	295	512	4,1
Combinaisons comprenant la norme VZE neutre							
+ Norme VZE + Système de redevance-remise	94,3	30,5	-9,6	-7,2	298	523	4,8
+ Norme VZE + Normes d'émissions de GES renforcées	95,7	24,7	-10,8	-7,7	275	480	4,4
+ Norme VZE + Normes d'émissions de GES renforcées + Système de redevance-remise	95,8	24,6	-11,1	-7,5	292	507	5,3
Combinaisons comprenant la norme VZE limitée aux VEB							
+ VEB + Système de redevance-remise	94,3	27,5	-10,1	-8,1	305	537	5,1
+ VEB + Normes d'émissions de GES renforcées	94,7	22,8	-11,0	-8,7	285	499	4,6
+ VEB + Normes d'émissions de GES renforcées + Système de redevance-remise	94,3	21,7	-11,4	-8,3	299	527	3,4

5.6 Sommaire des coûts des politiques et des scénarios

Le tableau 8 résume les principaux résultats pour chacun des scénarios mettant en œuvre une politique. La moitié gauche illustre les répercussions de la politique sur quatre indicateurs :

- La part de marché des VZE neufs en 2035;
- Les émissions de GES (Mt) en 2035;
- La variation (baisse) en pourcentage des bénéfices par rapport aux bénéfices du scénario de référence (2020-2035);
- La variation (baisse) en pourcentage du surplus de consommation par rapport à celui du scénario de référence (2020-2035).

Bien que les deux colonnes de gauche (ventes de VZE et émissions de GES) aient été traitées en détail ci-dessus, l'accent est mis ici sur les coûts des politiques et sur les compromis qui découlent afin d'atteindre les différents niveaux d'atténuation des émissions de GES.

Les répercussions sur les bénéfices et sur l'utilité de la consommation sont les deux éléments pris en compte dans le calcul du coût total des politiques observées. Suivant la convention, nous établissons les coûts de la politique en dollars par tonne évitée d'émissions ($/tonne) — le coût privé total (surplus de consommation et profit des constructeurs automobiles) par tonne d'éq. CO_2 évitée par rapport au scénario de référence. Les pertes de profit résultent, d'une part, du fait que le fabricant automobile doit modifier ses pratiques (tarification, investissement en R&D, et autres stratégies) par rapport à la référence. D'autre part, ces pertes s'expliquent par une diminution des ventes et des marges de profit ainsi que par des coûts de production et de mise à l'échelle accrus au cours des premières années de mise en œuvre de la ou des politique(s). La perte d'utilité de la consommation est causée par les changements dans les habitudes d'achat individuels, qu'il soit question du type de véhicule choisi, du prix potentiellement plus élevé de ce véhicule ou des coûts liés à la conduite en général.. À titre de rappel, les coûts excluent la valeur des co-bénéfices liés à la réduction de la pollution atmosphérique et sonore ainsi qu'à une amélioration de la santé et de la sécurité routière. Tenir compte de ces gains entraînerait probablement des coûts moindres. Dans certains cas, des bénéfices nets (coûts négatifs) pourraient même être observés.Nous voyons dans le tableau 8 que les politiques qui limitent le choix (notamment une norme VZE qui impose un plafond aux VHR ou qui ne permet que les VEB) entraîneront des pertes plus importantes en ce qui concerne les bénéfices et l'utilité de la consommation. De plus, les combinaisons de politiques menant à une plus grande réduction des GES entraînent également une plus grande perte de profits, ainsi qu'une réduction de l'utilité de la consommation et des dépenses gouvernementales.

Nous voyons dans le tableau 8 que les politiques qui limitent le choix (notamment une norme VZE qui impose un plafond aux VHR ou qui ne permet que les VEB à partir de 2030) entraîneraient des pertes plus importantes en ce qui concerne les profits et l'utilité de la consommation. De plus, les combinaisons de politiques menant à une plus grande réduction des GES entraîneraient également une plus grande perte de profits, une réduction de l'utilité de la consommation et des dépenses moindres pour le gouvernement.

Nous calculons le coût total ($/tonne) d'un scénario de politique donné comme suit : la valeur actualisée nette de tous les effets sur les profits et l'utilité au cours de l'horizon temporel (2020-2035). Nous utilisons deux taux d'actualisation différents : i) 8 %, un taux privé répandu, ce qui met davantage l'accent sur les coûts et les bénéfices actuels et à court terme, et ii) 3 %, un taux de rendement social répandu, qui met davantage l'accent sur les coûts et les avantages à long terme.

En général, nous constatons que les politiques les plus efficaces (ou les plus rentables) sont, d'abord, la norme VZE neutre (268 $ par tonne avec un taux d'actualisation de 8 %) et, ensuite, les normes d'émissions de GES renforcées (283 $ par tonne avec un taux d'actualisation de 8 %). La combinaison des deux entraîne un coût stratégique tout aussi efficace (275 $ par tonne avec un taux d'actualisation de 8 %).

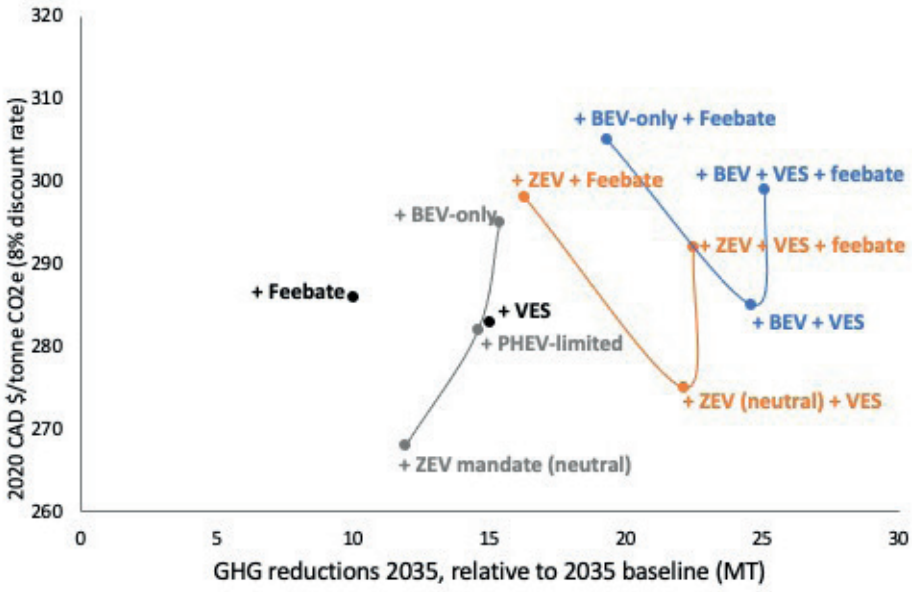
En revanche, instaurer un système de redevance-remise entraîne des coûts relativement plus élevés lorsqu'il est adopté seul. De plus, les combinaisons de politiques incluant un système de redevance-remise ont tendance à être plus coûteuses que les combinaisons de politiques qui ne le proposent pas. Cela s'explique par le fait que,

parmi les politiques étudiées, la redevance-remise se concentre plus étroitement sur un seul mécanisme : la modification des prix d'achat des VZE et des véhicules conventionnels. En revanche, les politiques incluant des normes d'émissions de GES renforcées et une norme VZE incitent les constructeurs automobiles à choisir parmi une variété d'options permettant de se conformer aux objectifs (y compris les subventions à prix croisés, ainsi que les investissements en R&D, une plus grande disponibilité des véhicules et les investissements dans la recharge) et, ainsi, à déterminer quelles sont les options les moins coûteuses pour atteindre les cibles.

Les scénarios qui comprennent une norme VZE avec plafond sur les VHR ou limitée aux VEB ont également tendance à être moins efficaces. En particulier, une norme limitée aux VEB coûte environ 10 % plus cher qu'une norme VZE neutre. Le raisonnement repose simplement sur le fait que la norme VZE neutre offre un plus grand nombre d'options aux consommatrices et consommateurs ainsi qu'aux constructeurs automobiles (en particulier l'intéressante option que constituent les VHR, comme l'indiquent divers sondages menés auprès des acheteuses et acheteurs d'automobiles du Canada). En restreignant ou en éliminant cette option, il sera plus coûteux d'atteindre les cibles de réduction des émissions de GES et de ventes de VZE.

La figure 20 présente une comparaison sommaire de la rentabilité des politiques en fonction des réductions d'émissions de GES observées. Outre les scénarios qui comprennent une redevance-remise, une tendance claire se dégage : les scénarios les plus efficaces ont tendance à être les plus coûteux, ce qui suit le principe économique de l'augmentation des coûts marginaux d'atténuation. Les stratégies d'atténuation les moins coûteuses ont tendance à être mises en œuvre en premier (surtout lorsqu'une politique relativement neutre sur le plan technologique est déployée). Ce faisant, une politique plus rigoureuse devrait être plus coûteuse en dollars par tonne, surtout en ce qui concerne les dernières unités d'émissions de GES à éviter. C'est pourquoi nous constatons que les trois versions de la norme VZE vont de la réduction d'émissions de GES la moins importante, mais aussi la moins chère (norme VZE neutre) à la plus efficace, qui est aussi la plus coûteuse (norme limitée aux VEB).

Figure 20. Comparaison de la rentabilité des politiques (en $/tonne) d'ici 2035 en matière de réduction des émissions de GES (scénario médian, taux d'actualisation de 8 %)



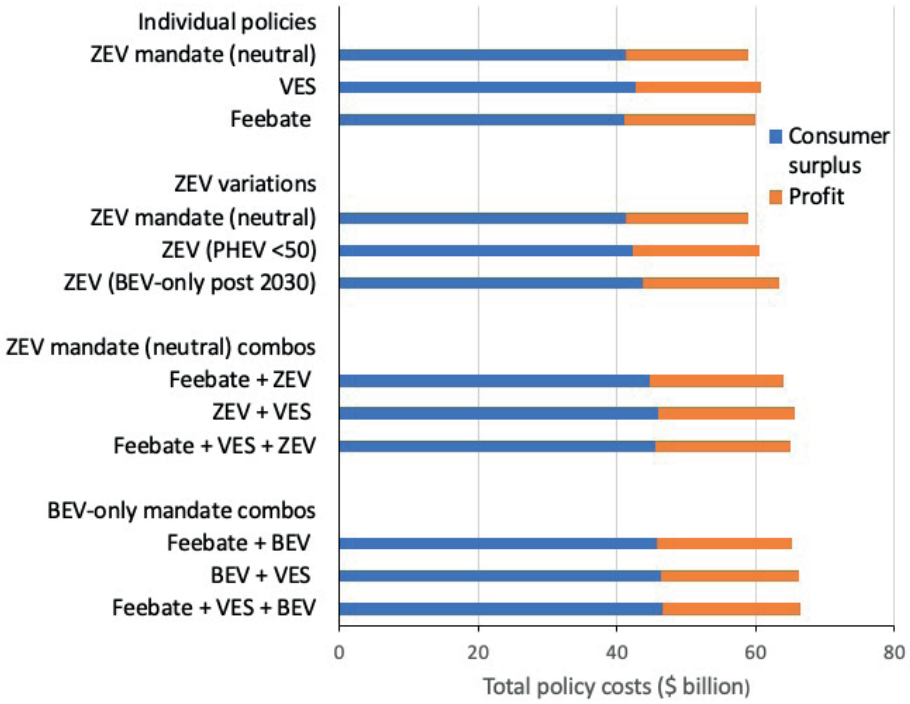
Autrement dit, la réduction plus importante des émissions de GES entraîne un coût supplémentaire, parce que l'impact négatif sur le surplus de consommation et sur les profits des constructeurs automobiles demeure plus élevé dans les scénarios où les émissions de GES sont plus élevées, ce qui pousse ces mêmes constructeurs, tout comme les consommatrices et consommateurs, à se distancer de leurs décisions habituelles. Par exemple, dans le tableau 8, les baisses du surplus de consommation (-4,8 %) et des profits des constructeurs automobiles

(-7,6 %) dans le scénario Référence + Normes d'émissions de GES renforcées sont plus élevées que celles du scénario Référence + Norme VZE (-3,9 % pour le surplus de consommation; -6,8 % pour les profits de l'industrie automobile). De plus, toutes les combinaisons de deux ou trois politiques entraînent des réductions de GES beaucoup plus importantes qu'une politique individuelle, tout en possédant aussi un coût plus élevé exprimé en dollars par tonne ($/tonne).

Encore une fois, nous attirons l'attention sur trois scénarios offrant des options relativement peu coûteuses pour des réductions assez importantes de GES : la norme VZE neutre appliquée seule ; la norme VZE neutre + les normes d'émissions de GES renforcées ; et la norme limitée aux VEB + les normes d'émissions de GES renforcées. **Parmi ces scénarios, la norme VZE neutre combinée aux normes d'émissions de GES renforcées pour les véhicules légers semble offrir un équilibre particulièrement efficace.**

La figure 21 propose une perspective légèrement différente : elle présente les coûts totaux des différents scénarios (2020-2025, taux d'actualisation de 8 %) plutôt que les coûts par tonne. Encore une fois, les politiques les plus efficaces ont tendance à être plus coûteuses, mais le classement est légèrement différent (puisqu'il comprend les coûts totaux) et ne tient pas compte des différents impacts sur les GES. Il est clair que la majorité des coûts liés aux politiques (environ les deux tiers parmi tous les scénarios) proviennent de la baisse du surplus de consommation — le reste constituant la perte de profits.

Figure 21. Coûts totaux de chaque scénario (2020-2035, taux d'actualisation de 8 %)



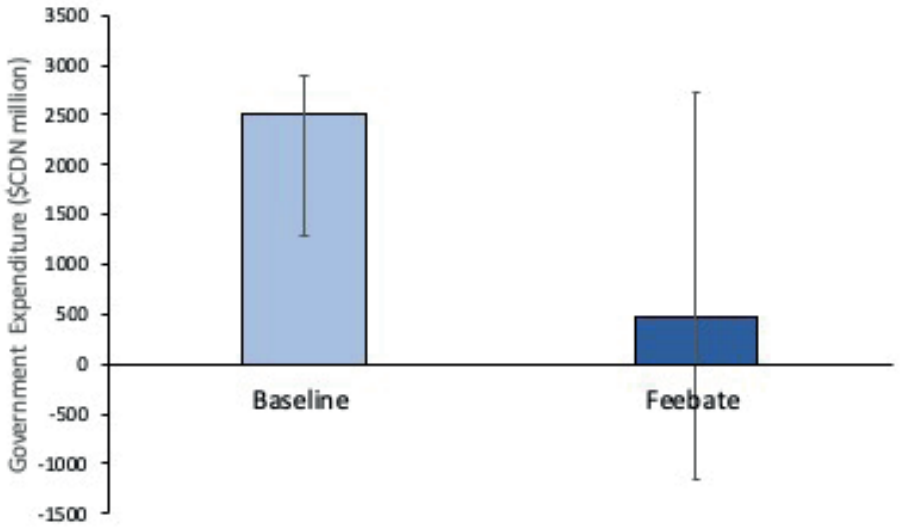
Enfin, nous considérons les dépenses publiques directes, qui ne tiennent compte que des subventions à l'achat de VZE qui sont versées, moins les redevances perçues dans les scénarios incluant un système de redevance-remise. Le tableau 8 présente les chiffres relatifs aux dépenses pour chaque scénario, bien que la figure 22 présente la comparaison la plus claire entre le scénario référence et le scénario modélisant l'adoption d'un système de redevance-remise. Dans le scénario de référence, nous remarquons que les subventions représentent environ 2,5 milliards de dollars en dépenses totales (scénario médian), tandis que le scénario proposant le

système de redevance-remise entraîne des dépenses représentant moins d'un cinquième de ce montant (400 millions de dollars). La même figure montre aussi que la redevance-remise fait l'objet d'une marge d'incertitude particulièrement grande. Les dépenses gouvernementales concernant le programme de redevance-remise peuvent varier entre un coût de plus de 2,5 milliards de dollars et un gain net de 1 milliard de dollars (selon les ventes de VZE réalisées par rapport aux ventes de véhicules conventionnels). Comme mentionné plus tôt, ces extrêmes pourraient être modérés si un le programme était conçu de manière à ce que les montants des subventions et des redevances soient adaptés annuellement au cours de l'horizon temporel de la modélisation. Cela permettrait d'assurer l'autofinancement du programme.

Nous recommandons de ne pas porter une attention trop grande sur les montants associés aux dépenses publiques dans les autres scénarios (tableau 8), car ceux-ci indiquent simplement des dépenses plus élevées associées à des ventes de VZE plus élevées lorsque des subventions ou un programme de redevance-remise sont instaurés.

Comme mentionné, nous utilisons le même système de redevance-remise (section 4.2), celui-ci ayant été conçu pour être capable de s'autofinancer dans le cadre du scénario comprenant uniquement ce programme. Il serait plus réaliste (et préférable) d'adopter une approche qui ajuste les montants associés à la redevance-remise sur une base régulière (par exemple annuellement) et en fonction des besoins pour maintenir la neutralité fiscale du programme.

Figure 22. Total des dépenses gouvernementales (non actualisées) dans le scénario de référence et dans le avec le programme de redevance-remise seulement



6. Sommaire des principales conclusions

Cette étude offre un aperçu de l'efficacité (en termes de ventes de VZE et de réduction des émissions de GES) et de la rentabilité de plusieurs politiques en matière de véhicules légers. Bien qu'une analyse complète des politiques devrait tenir compte d'un plus large éventail d'impacts (y compris l'acceptabilité politique et l'équité ou la justice, ainsi que les co-bénéfices comme la réduction de la pollution atmosphérique et sonore ainsi que l'amélioration de la santé publique et de la sécurité publique), nous croyons que la présente étude fournit des

informations utiles qui sont énumérées ici.

1. **Les politiques actuelles (scénario « Référence ») au Canada (en date de septembre 2021) sont loin d'être suffisantes pour atteindre les cibles de ventes de VZE (2030 et 2035) et de réduction des émissions de GES (2030).** Même avec les conditions « optimistes » entourant la vente de VZE (en supposant que les batteries sont peu chères, que le prix de l'essence est élevé, que les préférences individuelles favorisent les VZE et que les infrastructures de recharge soient complètement installées, entre autres facteurs), ces politiques sont loin d'être à la hauteur.

2. **Les objectifs de vente de VZE pour 2030 et 2035 peuvent être atteints (ou presque atteints, à quelques points de pourcentage près) par une version « forte » des trois politiques** examinées, soit une norme VZE, des normes d'émissions de GES des véhicules légers renforcées ou un système de redevance-remise. Pour permettre l'atteinte des objectifs, dans chacun des cas, la politique doit être suffisamment rigoureuse : elle doit inclure des sanctions sévères en cas de non-conformité pour la norme VZE et les normes d'émissions de GES renforcées. Par exemple, en plus des politiques climatiques actuelles, on pourrait adopter une norme VZE atteignant 100 % d'ici 2035, ou de nouvelles normes d'émissions de GES exigeant que les nouveaux véhicules émettent 40 g/km ou moins d'ici 2035. Atteindre l'objectif de 100 % de ventes de VZE d'ici 2035 en particulier pourrait s'avérer difficile, étant donné qu'un pourcentage important de consommatrices et consommateurs de véhicules légers pourrait encore percevoir négativement ce type de véhicule, et ce, même en 2035.

3. **Parmi les trois politiques isolées, la norme VZE neutre demeure le moyen le plus rentable d'atteindre l'objectif de ventes de VZE de 2035.** Directement axée sur l'objectif de vente des VZE, cette politique permet aux constructeurs automobiles de choisir parmi une variété de stratégies pour se conformer à ses exigences : investissements en R&D, subventions à prix croisés, plus grande variété de véhicules et un accès accru à la recharge pour les individus. La norme VZE constitue également une voie plus sûre pour atteindre l'objectif de vente de 2035, et il comprend une incertitude plus faible que les autres politiques.

4. **Les trois normes sVZE offrent différents compromis (tradeoffs) entre l'efficacité ($/tonne) et l'intensité des réductions des émissions de GES.** Une norme VZE avec plafond sur les VHR à 50 % à compter de 2030 et une norme VZE les éliminant et n'exigeant que des VEB à compter de 2030 entraînent des réductions plus importantes d'émissions de GES, mais constituent des voies moins rentables. Plus précisément, la norme VZE neutre entraîne une réduction de 25 % des émissions de GES à 268 $ la tonne; la norme avec plafond sur les VHR entraîne une réduction de 31 % des GES à 277 $ la tonne; et la norme limitée aux VEB entraîne une réduction de 33 % des GES à 295 $ la tonne. Ces différences s'expliquent par le fait que, bien que les VEB soient plus avantageux sur le plan climatique que les VHR, l'offre limitée réduira l'utilité de la consommation et entraînera une baisse de profits pour les constructeurs automobiles.

5. **Parmi les trois types de politiques, ce sont les normes plus rigoureuses sur les émissions de GES des véhicules légers qui permettraient d'obtenir les réductions les plus importantes de GES d'ici 2035 (en seconde place après une norme VZE limitée aux VEB).** Bien qu'elles entraînent des coûts un peu plus importants ($/tonne), les normes d'émissions de GES renforcées permettent de réduire les émissions en 2035 de manière plus importante (32 % par rapport au scénario de référence en 2035) que ce qui est permis avec la norme VZE neutre (25 %) et la redevance-remise (21 %).

6. **Le système de redevance-remise est généralement plus coûteux que les autres politiques ($/tonne) en ce qui concerne les coûts privés (pour les individus et les constructeurs automobiles).** Il s'agit de la politique qui, appliquée seule, est la plus coûteuse, et toute combinaison de politiques assortie d'une redevance-remise a tendance à être plus coûteuse qu'une combinaison ne comprenant pas cette politique (sans permettre des réductions d'émissions de GES significativement plus élevées).

7. **Parmi tous les scénarios modélisés, nous croyons qu'il faut accorder une attention particulière à la norme VZE neutre combinée aux normes d'émissions de GES renforcées.** Ce scénario entraîne des réductions relativement importantes des émissions de GES (-47 % en 2035 par rapport au scénario de référence cette année-là) à un niveau de rentabilité ($/tonne) qui se classe au deuxième rang derrière la norme VZE neutre

(comme il a été mentionné, ce dernier réduit les émissions de GES de 2035 de 25 % seulement).

8. **La combinaison des trois politiques (une norme VZE, des normes d'émissions de GES plus exigeantes et un système de redevance-remise) mène à des réductions encore plus importantes en matière d'émissions de GES.** Toutes les combinaisons de politiques mènent à des réductions d'émissions qui dépassent celles entrainées par les politiques individuelles, variant entre -35 % en 2035 par rapport aux valeurs de référence (avec une norme VZE neutre + système de redevance-remise) et -54 % (avec une norme limitée aux VEB, des normes d'émissions de GES renforcées et un programme de redevance-remise). Cependant, l'efficacité des combinaisons semble plus favorable en l'absence d'une redevance-remise (Norme VZE neutre + oNormes d'émissions de GES renforcées ou Norme limitée aux VEB + Normes d'émissions de GES renforcées). En règle générale, la réduction des émissions de GES découlant de l'ajout d'un programme de redevance-remise (s'ajoutant aux combinaisons de politiques plus ambitieuses) n'est pas significative par rapport à l'augmentation des coûts des politiques, ce qui entraîne une diminution de la rentabilité. Cela dit, un système de redevance-remise plus souple (qui ajuste les redevances et les subventions chaque année pour maintenir la capacité du programme à s'autofinancer) pourrait être plus rentable.

9. **L'efficacité des politiques a tendance à être moindre(prix plus élevé/tonne) lorsque les options technologiques sont limitées (en particulier les VHR), lorsque les options de conformité sont limitées (notamment avec la redevance-remise) ou lorsque les réductions globales des émissions de GES sont plus importantes.** Comme il a été mentionné, certaines des politiques qui favorisent la vente de davantage de VEB (les normes d'émissions de GES renforcées et la norme VZE limitée aux VEB) entraînent une plus grande réduction des émissions de GES, mais sont également plus coûteuses(en termes d'impacts le surplus de consommation et les profits des constructeurs automobiles).

7. Répercussions politiques

Le choix d'une combinaison idéale de politiques exige de tenir compte de plusieurséléments. Voici un aperçu d'un sous-ensemble de critères d'évaluation des politiques, à savoir les répercussions qui se font sentir sur :

- Les ventes de VZE;
- Les réductions des émissions de GES;
- Les coûts associés aux politiques;
- L'incertitude des estimations futures.

Par rapport à un système de redevance-remise, nous estimons que la norme VZE ou les normes d'émissions de GES renforcées sont plus efficaces pour réduire les émissions de GES, en plus d'être plus rentables. La combinaison des deux politiques est particulièrement prometteuse. Avoir recours à une norme VZE limitée aux VEB à partir de 2030 peut entraîner une réduction des émissions de GES encore plus importante, mais à un coût plus élevé.

Pour permettre une évaluation plus complète des politiques, les recherches futures devraient également tenir compte de l'acceptabilité politique de chaque mesure, ainsi que des répercussions possibles sur l'équité, qui n'ont pas été étudiés dans le présent cas. Nous reconnaissons également que nos calculs de rentabilité ne tiennent pas compte des co-bénéfices pour la société tels que la réduction de la pollution atmosphérique et sonore ainsi qu'une meilleure santé publique et une meilleure sécurité routière. L'inclusion de ces co-bénéfices réduirait probablement les coûts des scénarios examinés, bien que nous nous attendions à ce que le classement relatif de ces derniers demeure le même.

8. Références

Environnement et ressources naturelle, Rapport d'inventaire national 1990-2019: sources et puits de gaz à effet de serre au Canada Sources et puits de gaz à effet de serre https://publications.gc.ca/site/fra/9.816351/publication.html (2021).

Axsen, J., Bailey, J. & Castro, M. A. Preference and lifestyle heterogeneity among potential plug-in electric vehicle buyers. *Energy Economics* 50, 190-201, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2015.05.003 (2015).

Axsen, J., Mountain, D. C. & Jaccard, M. Combining stated and revealed choice research to simulate the neighbor effect: The case of hybrid-electric vehicles. *Resource and Energy Economics* 31, 221-238 (2009).

Axsen, J. & Wolinetz, M. Reaching 30% plug-in vehicle sales by 2030: Modeling incentive and sales mandate strategies in Canada. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 65, 596-617, doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.09.012 (2018).

Barreto, L. & Kypreos, S. Endogenizing R&D and market experience in the "bottom-up" energy-systems ERIS model. *Technovation* 24, 615-629 (2004).

Bhardwaj, C., Axsen, J., Kern, F. & McCollum, D. Why have multiple climate policies for light-duty vehicles? Policy mix rationales, interactions and research gaps. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 135, 309-326 (2020).

Bhardwaj, C., Axsen, J. & McCollum, D. Simulating automakers' response to zero emissions vehicle regulation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 94, 102789, doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102789 (2021).

Brand, C., Cluzel, C. & Anable, J. Modeling the uptake of plug-in vehicles in a heterogeneous car market using a consumer segmentation approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 97, 121-136, doi: https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.01.017 (2017).

Burnett, R. T., Cakmak, S. & Brook, J. R. The Effect of the Urban Ambient Air Pollution Mix on Daily Mortality Rates in 11 Canadian Cities. *Canadian Journal of Public Health* 89(3), 152–156, doi: https://doi.org/10.1007/BF03404464 (1998).

Dimitropoulos, A., Rietveld, P. & van Ommeren, J. N. Consumer valuation of changes in driving range: A meta-analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 55, 27-45, doi: https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.08.001 (2013).

Dunsky Energy + Climate. Zero Emission Vehicle Availability Estimating Inventories in Canada: 2020/2021 Update. (2021).

Environment and Climate Change Canada. National Inventory Report 1990-2019: Greenhouse Gas Sources and Sinks in Canada, Canada's submission to the United Nations Framework Convention on Climate Change (2021).

Équiterre. The Road Ahead to Low-Carbon Mobility: A Feebate System for Canada's Light-Duty Vehicle Segment. (2020).

Ferguson, M., Mohamed, M., Higgins, C. D., Abotalebi, E. & Kanaroglou, P. How open are Canadian households to electric vehicles? A national latent class choice analysis with willingness-to-pay and metropolitan characterization. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 58, 208-224, doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.12.006 (2018).

Fouquet, R. Trends in income and price elasticities of transport demand (1850–2010). *Energy Policy* 50, 62-71,

doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.001 (2012).

Greene, D. L., Park, S. & Liu, C. Analyzing the transition to electric drive vehicles in the U.S. *Futures* 58, 34-52, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.futures.2013.07.003 (2014).

Greene, D. L. TAFV alternative fuels and vehicles choice model documentation. (Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory, Center for Transportation Analysis, 2001).

Hackbarth, A. & Madlener, R. Willingness-to-pay for alternative fuel vehicle characteristics: A stated choice study for Germany. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 85, 89-111, doi: https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.12.005 (2016).

Holmgren, J. Meta-analysis of public transport demand. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 41, 1021-1035, doi: https://doi.org/10.1016/j.tra.2007.06.003 (2007).

International Energy Agency. Net Zero by 2050. (IEA, Paris, France, 2021).

Jacobsen, M. R. Evaluating US Fuel Economy Standards in a Model with Producer and Household Heterogeneity. *American Economic Journal: Economic Policy* 5, 148-187 (2013).

Jagannathan, R., Matsa, D. A., Meier, I. & Tarhan, V. Why do firms use high discount rates? *Journal of Financial Economics* 120, 445-463, doi: https://doi.org/10.1016/j.jfineco.2016.01.012 (2016).

Klier, T. & Linn, J. The Price of Gasoline and New Vehicle Fuel Economy: Evidence from Monthly Sales Data. *American Economic Journal: Economic Policy* 2, 134-153, doi:10.1257/pol.2.3.134 (2010).

Kneoma. Crude oil price forecast (2021).

Kormos, C., Axsen, J., Long, Z. & Goldberg, S. Latent demand for zero-emissions vehicles in Canada (Part 2): Insights from a stated choice experiment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 67, 685-702, doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.10.010 (2019).

Lutsey, N., Cui, H. & Yu, R. Evaluating electric vehicle costs and benefits in China in the 2020–2035 time frame. (International Council for Clean Transportation, 2021).

National Energy Board. (2019).

National Research Council. Transitions to alternative vehicles and fuels. (National Academies Press, 2013).

Plötz, P., Moll, C., Bieker, G. & Mock, P. From lab-to-road: real-world fuel consumption and CO_2 emissions of plug-in hybrid electric vehicles. *Environmental Research Letters* 16, 054078, doi:10.1088/1748-9326/abef8c (2021).

Shamsi, H., Munshed, M., Tran, M.-K., Lee, Y., Walker, S., The, J., Raahemifar, K. & Fowler, M. Health Cost Estimation of Traffic-Related Air Pollution and Assessing the Pollution Reduction Potential of Zero-Emission Vehicles in Toronto, Canada. *Energies* 14(16), doi: https://doi.org/10.3390/en14164956 (2021).

Sykes, M. & Axsen, J. No free ride to zero-emissions: Simulating a region's need to implement its own zero-emissions vehicle (ZEV) mandate to achieve 2050 GHG targets. *Energy Policy* 110, 447-460, doi: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.08.031 (2017).

Thies, C., Kieckhäfer, K. & Spengler, T. S. Market introduction strategies for alternative powertrains in long-range passenger cars under competition. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 45, 4-27, doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.05.002 (2016).

US EIA. Annual Energy Outlook. (2020).

Weiss, M. et al. On the electrification of road transport - Learning rates and price forecasts for hybrid-electric and battery-electric vehicles. *Energy Policy* 48, 374-393, doi: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.05.038 (2012).

9. Annexe : Processus de validation

1 La structure du modèle devrait suivre la structure générale des modèles de simulation existants du marché automobile, lorsque de tels modèles sont disponibles et appropriés.

Comment *AUM* se comporte dans le cadre de ces tests[50]

La structure fondamentale du modèle s'appuie sur la littérature existante, si une telle littérature existe.

Le modèle axé sur la consommation s'appuie sur une fonction d'utilité standard, un modèle de choix discret couramment utilisé dans la littérature pour représenter les consommatrices et les consommateurs (Brand et coll., 2017; Axsen et Wolinetz, 2018; Xie et Lin, 2017; Conseil national de recherches du Canada, 2013). Le modèle *AUM* se base sur le modèle LAVE-Trans du Conseil national de recherches (2012). Toutefois, le modèle diffère en ce sens qu'il ne contient pas de paramètres de « perception du risque » et de « temps de charge » dans la fonction d'utilité. L'effet de ces derniers est toutefois inclus dans le paramètre ASC.

De même, le modèle du fabricant automobile s'appuie sur des publications existantes, comme celle de Michalek et coll. (2004), Zhang et coll. (2011), et Kang et coll. (2018).

Bien que le modèle *AUM* s'appuie sur les travaux de Michalek et coll. (2004) et de Kang et coll. (2018), il est singulier et novateur à plusieurs égards, notamment : la prévision à plus long terme (à périodes multiples) pour les constructeurs automobiles, la fonctionnalité endogène de variété de modèles, la conformité endogène envers les politiques et l'inclusion des suites de la R&D. L'autre caractéristique du modèle *AUM* est qu'il allie un modèle de consommation réaliste sur le plan comportemental et un modèle détaillé de fabricant d'automobiles — une combinaison rarement tentée jusqu'à présent.

Changements concernant l'élargissement du modèle jusqu'en 2035

La structure du modèle demeure la même.

L'utilité à la consommation est représentée à l'aide du même modèle de choix discret hiérarchique que dans la version originale de 2030.

Le constructeur automobile bénéficie maintenant de prévisions sur 15 ans, plutôt que sur 10 ans comme dans la version précédente prévoyant jusqu'en 2030. La durée de la prévision peut être modifiée au besoin, comme auparavant.

De même, le fabricant d'automobiles optimise ses profits en fonction de quatre décisions : i) les majorations de prix croisés; ii) l'investissement dans la R&D; iii) la variété de modèles; et iv) le déploiement de l'infrastructure de recharge.

50 Thies, C., Kieckhäfer, K. & Spengler, T. S. Market introduction strategies for alternative powertrains in long-range passenger cars under competition. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 45, 15, doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.05.002 (2016).

2 Les mécanismes utilisés dans le modèle (p. ex., apprentissage par la pratique, retombées de l'expérience, décisions d'achat) devraient s'appuyer sur des théories crédibles.

Comment *AUM* se comporte dans le cadre de ces tests

Les effets d'apprentissage s'appuient sur les travaux de Barreto et Kypreos (2004). De même, les décisions en lien avec la consommation et la maximisation des profits sont fondées sur la théorie économique (Goldberg, 1998; Austin et Dinan, 2005; Bento et coll., 2009; Jacobsen, 2013; Small, 2017).

Changements concernant l'élargissement du modèle jusqu'en 2035

Comme précédemment, notre modèle repose sur la théorie économique et la littérature. Sur ce point, aucun changement n'a été apporté.

3 Les équations mettant en relation les variables du modèle devraient être cohérentes sur le plan dimensionnel.

Comment *AUM* se comporte dans le cadre de ces tests

Cela implique que l'ordre et la forme des fonctions mathématiques conviennent à la fonctionnalité en question. Par exemple, par opposition à une fonction linéaire, une fonction de type logit (équation 1) est plus appropriée pour estimer la part de marché, puisque les valeurs maximales (1) et minimales (0) de ce type de fonction correspondent aux valeurs théoriques maximums (100 %) et minimums (0 %) que la part de marché des VZE peut atteindre.

De même, une fonction quadratique (équation 5) représente de plus près une courbe de coût typique plutôt qu'une fonction linéaire ou cubique.

Changements concernant l'élargissement du modèle jusqu'en 2035

La cohérence dimensionnelle des équations a été vérifiée, comme auparavant.

4 Les limites du modèle et le niveau d'agrégation devraient permettre de répondre aux questions de recherche précises.

Comment *AUM* se comporte dans le cadre de ces tests

Les questions de recherche auxquelles ce modèle veut répondre sont les suivantes :

(1) examiner les répercussions des caractéristiques de conception des politiques axées sur l'offre (p. ex., la norme VZE) sur les indicateurs de résultats comme la part de marché des nouveaux véhicules et la rentabilité des fabricants automobiles;

(2) examiner les différents types d'interactions existantes entre les politiques axées sur l'offre;

(3) examiner les différents mécanismes de conformité pour les constructeurs automobiles.

Le modèle semble bien équipé pour répondre à ces questions. La portée du modèle est limitée (il se concentre uniquement sur les véhicules légers), mais il représente de manière relativement détaillée les stratégies endogènes des constructeurs automobiles, les politiques axées sur l'offre, ainsi que des comportements réalistes de la part des consommatrices et des consommateurs.

Le fait d'inclure plusieurs constructeurs automobiles aurait davantage amélioré le modèle. Toutefois, le niveau de désagrégation et de complexité computationnelle semble semblable à celui présent dans d'autres modèles prédisant la part de marché des VER, comme dans le modèle *REPAC* (dans Axsen et Wolinetz, 2018) et SCMI (Jaccard et coll., 2003); ce niveau semble approprié pour le travail actuel.

Changements concernant l'élargissement du modèle jusqu'en 2035

Aucun changement n'est nécessaire.

5 Dans la mesure du possible, les paramètres du modèle devraient s'appuyer sur des données empiriques.

Comment *AUM* se comporte dans le cadre de ces tests

La majorité des paramètres du modèle *AUM* s'appuient sur des données empiriques recueillies au moyen d'enquêtes canadiennes (Axsen et coll., 2015 ; Kormos et coll., 2019) et nous utilisons des données d'autres modèles (p. ex., Conseil national de recherches, 2013) où des données empiriques ne sont pas disponibles.

Changements concernant l'élargissement du modèle jusqu'en 2035

Les valeurs d'entrée ont été mises à jour comme suit :

1. Prix du carburant en 2035 selon l'EIA (2021)

2. La variété des modèles disponibles atteindra 100 % d'ici 2035 dans le scénario médian, conformément à ce qui a été annoncé par les fabricants automobiles (Ford, 2021 ; GM, 2021).

3. La disponibilité des bornes de recharge atteint 100 % d'ici 2035 dans le scénario médian, conformément aux annonces du gouvernement (Gouvernement du Canada, 2021)

4. Autonomie : Des VÉ à grande autonomie étaient aussi présents dans la version de 2030. Cela demeure inchangé.

5. Coûts du carburant : Les coûts du carburant pour les VZE diminuent parallèlement à la baisse des prix de l'électricité (Office national de l'énergie, 2020), et atteindront 0,019 $/km d'ici 2035.

6. Les préférences des consommatrices et consommateurs (p. ex., le modèle *AUM*) ont été mises à jour (tableau 2), de manière à refléter une amélioration plus rapide que prévu de ces préférences au fil du temps. Justification de la mise à jour des préférences des consommatrices et des consommateurs - 1) Rétroaction provenant des évaluations au sujet des articles déjà soumis, qui ont souligné que les préférences des consommatrices et des consommateurs pourraient se tourner vers les VZE plus rapidement que nous le pensions dans la version originale. 2) Pour ce qui est du degré initial des préférences des consommatrices et des consommateurs, les ventes de véhicules neufs en 2035 ont chuté de plus de 30 % par rapport aux ventes du scénario de référence en 2035, en raison de l'effet d'une norme VZE (avec une exigence de 100 % de ventes de VZE d'ici 2035).

À titre d'hypothèse simplificatrice, nous supposons que l'utilité marginale concernant le revenu des consommatrices et des consommateurs (telle que saisie par le coefficient du prix d'achat) demeure la même de 2020 à 2030 (version originale) ainsi qu'en 2035 (version étendue). Les coefficients des autres paramètres sont maintenus constants aux niveaux enregistrés en 2020, comme dans la version de 2030.

D'autres paramètres s'articulant autour du principe de l'offre (p. ex., les taux d'apprentissage, les taux d'actualisation des constructeurs d'automobiles) demeurent constants.

6 S'assurer que le modèle produise un comportement plausible et réaliste.

Comment *AUM* se comporte dans le cadre de ces tests

Pour le scénario de référence, nous générons une série de sous-extrants du modèle (p. ex., part de marché, coûts et prix des véhicules), afin de nous assurer que ces valeurs sont réalistes, en comparant les résultats à d'autres études de modélisation ou à des données réelles. À titre d'exemple, la nouvelle part de marché des véhicules légers estimée en fonction du modèle pour le Canada correspond aux données réelles pour les années 2018, 2019 et 2020 (figure 4). Les sections 4.1 à 4,2 de l'article principal présentent les projections du scénario de référence générées de façon endogène par le modèle.

Selon les estimations provenant de la littérature grise, la marge bénéficiaire brute par véhicule varie entre 4000$ et 13000$ CA (Motor Monitor, 2020). En moyenne, plus de deux millions de véhicules ont été vendus au Canada en 2019, équivalent à une valeur brute de profit d'entre 14 et 15 milliards de dollars canadiens pour l'industrie automobile. Cette valeur est semblable à la valeur estimée grâce au modèle. De même, l'Association canadienne des constructeurs de véhicules affirme que l'industrie de la fabrication automobile investit environ 20 milliards de dollars canadiens dans l'économie canadienne (ACCV, 2020).

Changements concernant l'élargissement du modèle jusqu'en 2035

Tests comportementaux réalisés :

1. Selon le scénario de référence (avec les politiques actuelles, p. ex., taxe, norme sur les combustibles, normes d'émissions de GES des véhicules actuelles), le nouveau marché devrait se situer entre 35% et 42%, conformément aux estimations de Transports Canada (Transports Canada, 2021).

2. Les coûts des véhicules, estimés de manière endogène, dans le scénario de référence pour la classe des berlines sont les suivants (cas médian) : VEB -380 (20125$ en 2025; 18775$ en 2030; 16543$ en 2035); VHR -60 (20085$ en 2025; 19200$ en 2030; 19300$ en 2035). Les coûts de production des véhicules et les prix correspondants sont semblables aux estimations ascendantes fournies par Lutsey et coll. (2021) en ce qui concerne les prix des VER.

3. Les ventes de véhicules neufs s'élevaient à 1,5 million de véhicules légers en 2020, en baisse de 20% par rapport à 1,9 million en 2019 (1,8 million en 2018). Dans un rapport récent, le gouvernement du Canada prévoit 1,72 million de nouvelles ventes en 2023, 1,75 million en 2024 et 1,8 million en 2025 (Environnement et Changement climatique Canada, 2021). L'EIA (2021, p. 131) estime que les ventes mondiales de véhicules neufs augmenteront d'environ 1,7% par année. Selon le scénario de référence, les ventes de véhicules neufs sont estimées par voie endogène à 1,6 million en 2035, ce qui est conforme à la documentation susmentionnée.

4. L'industrie automobile a contribué à hauteur de 20 milliards de dollars à l'économie canadienne en 2019. En supposant une croissance semblable au taux de croissance du PIB canadien (~2%), la contribution de l'industrie automobile pourrait se chiffrer à environ 26 milliards de dollars d'ici 2035. Notre modèle estime les bénéfices bruts à 20 milliards de dollars dans le scénario médian de référence.