Modélisation d'une norme sur les véhicules zéro émission et de subventions pour les véhicules légers au Canada (2023-2035)

Préparé pour
Environmental Defence et Équiterre

Par la Sustainable Transportation Action Research Team (START)

Jonn Axsen, directeur
Chandan Bhardwaj, chercheur

environmental defence

Équiterre

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 :

Marchés du transport à faibles émissions	Infrastructures et approvisionnement en carburant pour le transport à faibles émissions	Acceptabilité de politiques et de carburants alternatifs	Modélisation des systèmes de transport à faibles émissions

À propos d'Environmental Defence

Environmental Defence est un organisme de défense de l'environnement chef de file au Canada qui travaille avec le gouvernement, l'industrie et des personnes pour protéger l'eau potable, un environnement climatique sécuritaire et des collectivités saines. Depuis plus de 35 ans, Environmental Defence travaille au niveau municipal, provincial et fédéral pour protéger notre eau douce, créer des communautés viables, réduire l'exposition des Canadien(ne)s aux produits toxiques, mettre fin à la pollution plastique, s'attaquer aux changements climatiques et bâtir une économie propre.

À propos d'Équiterre

Équiterre travaille à rendre tangibles, accessibles et inspirantes les transitions vers une société écologique et juste. Depuis 1993, Équiterre contribue à la recherche de solutions, à la transformation des normes sociales et à l'émergence de politiques publiques ambitieuses par des initiatives de recherche, d'accompagnement, d'éducation, de mobilisation et de sensibilisation. Ces progrès contribuent à établir de nouveaux principes pour notre alimentation, nos déplacements, notre production et notre consommation, qui sont conçus pour nos communautés, respectueux de nos écosystèmes, en accord avec la justice sociale et, bien sûr, faibles en carbone.

Table des matières

Sommaire exécutif **4**
1. Introduction **9**
2. Objectifs de la recherche **10**
3. *AUtomaker-Consumer Model* (AUM) **11**

3.1 Modélisation de la demande 12
3.2 Modélisation de l'offre 17
3.3 Calcul des émissions de GES 19
3.4 Analyste de l'incertitude 21

4. Scénarios de politiques **22**
5. Résultats et discussion **27**

5.1 Ventes de VZE 27
5.2 Émissions de GES 31
5.3 Répercussions sur les constructeurs automobiles : Profits, marges bénéficiaires, prix des véhicules et investissements en R&D 32
5.4 Subventions : Dépenses publiques et part des constructeurs automobiles 36

6. Principales conclusions **39**
Références **41**

Sommaire exécutif

Contexte

Le Canada a fait preuve d'ambition au moment de fixer ses objectifs de vente de véhicules zéro émission (VZE). En effet, les cibles fédérales de ventes annuelles de véhicules légers sont de 20 % d'ici 2026, de 60 % d'ici 2030 et de 100 % d'ici 2035.[1] Bien que les objectifs soient décrits comme étant des « cibles obligatoires », on ne sait pas encore quels mécanismes stratégiques ou quelles combinaisons de politiques seront déployés pour provoquer une telle hausse des ventes. D'après des données recueillies à l'échelle internationale, pour atteindre l'objectif de ventes de VZE établi à 100 %, il faudra sans nul doute faire intervenir une politique ou une combinaison de politiques climatique(s) plus vigoureuse(s) que celles qui sont en vigueur à l'heure actuelle au Canada.

La présente étude explore deux voies réglementaires devant permettre au Canada d'atteindre ses objectifs de vente de VZE et qui vont au-delà des politiques actuelles dites « de référence ». Voici ces deux scénarios :

1. **Une norme stricte sur les ventes de VZE** exigeant des constructeurs automobiles que leurs VZE occupent une part de marché conforme aux objectifs de vente fixés. Cette norme s'assortit d'une forte pénalité financière imposée pour non-conformité (20 000 $[2] par crédit);
2. **Une stratégie axée sur les subventions** qui triple le montant des subventions fédérales à l'achat de VZE, le fixant à 15 000 $ pour les véhicules électriques à batterie (ainsi que la plupart des véhicules hybrides rechargeables). Nous modélisons cette stratégie avec plusieurs durées : à court terme (d'ici 2026), à moyen terme (jusqu'en 2030) et à long terme (d'aujourd'hui à 2035).

La combinaison de la norme VZE et de la subvention à long terme est aussi modélisée. Ce rapport compare ces scénarios de politiques en considérant les ventes de VZE, la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), les profits des constructeurs automobiles, les marges bénéficiaires et le prix des véhicules, ainsi que les dépenses publiques.

Méthode

Le modèle *AUtomaker-Consumer Model* (AUM) est utilisé 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 constructeurs automobiles 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) les investissements en recherche et développement (R&D) dans le but de réduire les coûts futurs des VZE. Les paramètres sont tirés de la littérature scientifique, et le rendement du

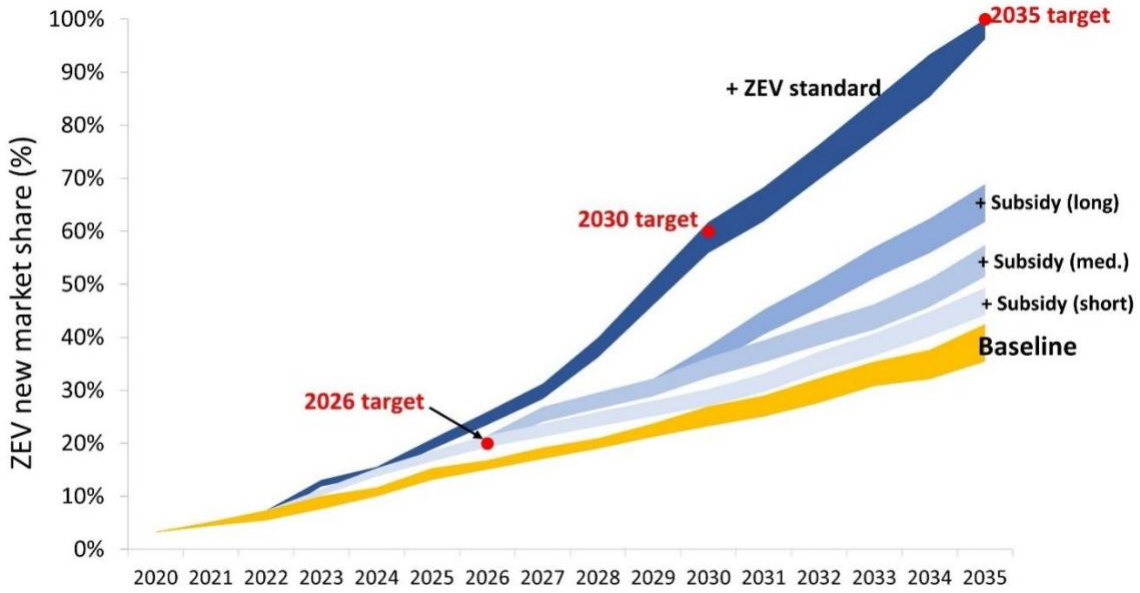
[1] Gouvernement du Canada (2022), Objectifs des ventes des véhicules zéro émission (VZE) au Canada, URL
[2] Dans ce rapport, toutes les sommes sont en dollars canadiens, sauf indication contraire.

modèle est harmonisé avec les ventes actuelles et les prévisions d'autres modèles et études. L'incertitude est représentée en effectuant une analyse de l'incertitude avec les paramètres « optimistes » et « pessimistes » vis-à-vis de l'adoption des VZE. Des fourchettes d'incertitude sont ainsi proposées pour les extrants clés de la modélisation.

Principales conclusions

1. Ventes de VZE : On constate que les politiques actuelles (« de référence ») au Canada (à l'été 2022) sont loin d'être suffisantes pour atteindre les objectifs de vente de VZE en 2030 ou en 2035 (figure ES1). Les trois scénarios s'articulant autour des subventions font augmenter la part de marché des VZE en 2035, la faisant passer entre 44 et 69 % parmi les nouveaux véhicules. Les objectifs de vente de VZE pour 2030 et 2035 ne sont toutefois pas atteints, et ce, même dans des conditions optimistes ou en prenant en compte une subvention nationale de 15 000 $ en vigueur jusqu'en 2035. En revanche, la norme VZE fait en sorte que ces véhicules occuperont une part de marché entre 95 et 100 % en 2035 - atteignant les cibles nationales de vente ou s'en rapprochant de très près.

Figure ES1 : Part de marché national pour les VZE dans les ventes de véhicules neufs (politiques individuelles, cas médian)



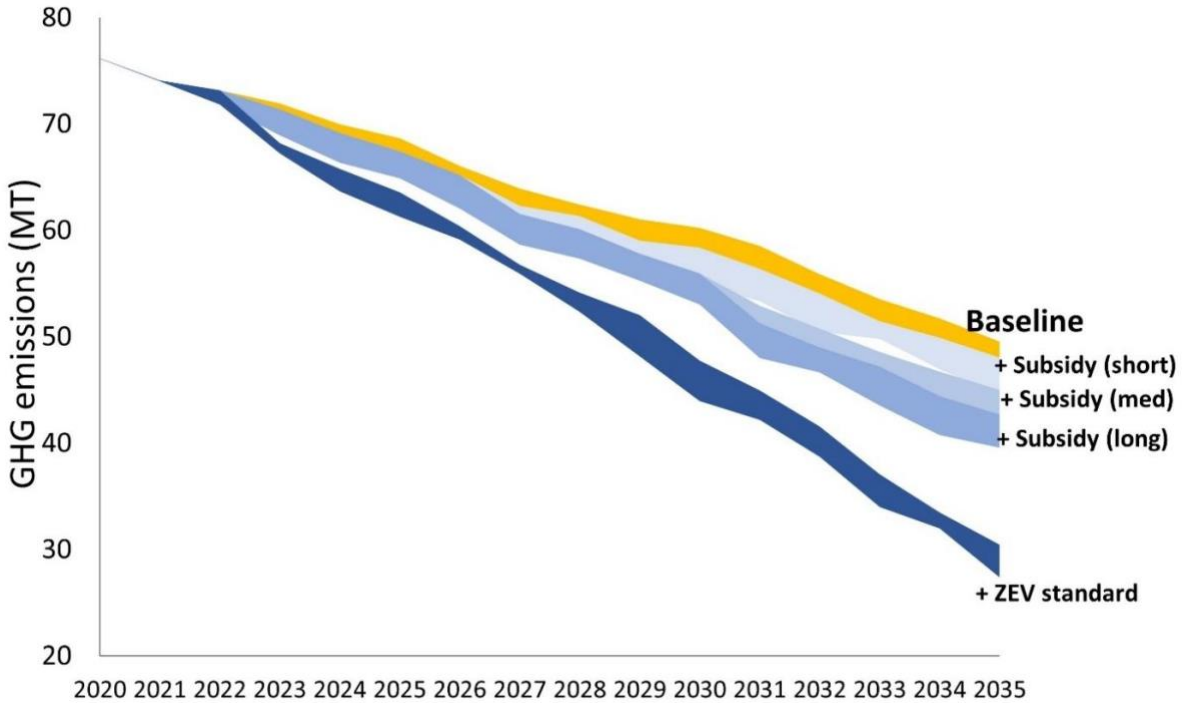
2. Émissions de GES : La norme VZE modélisée entraînerait une baisse de 58 à 62 % des émissions annuelles de GES provenant des véhicules légers d'ici 2035 par rapport aux niveaux de 2022 (figure ES2). Tripler les montants des incitatifs à l'achat à l'échelle du pays jusqu'en 2035 ne fait que réduire les émissions annuelles de 42 à 45 %. En ce qui concerne les émissions cumulatives de GES par rapport à celles du niveau de référence (2023-2035), les scénarios basés sur les subventions entraînent des réductions de GES de 11-19 mégatonnes (MT) dans le scénario à court terme, de 35-41 MT pour celui à moyen terme et de 39-50 MT pour le scénario à long terme. La norme VZE entraîne des réductions d'émissions de GES qui sont trois à dix fois plus importantes — atteignant 123 à 137 MT.

3. Profits des fabricants automobiles : Les profits engrangés par les constructeurs automobiles en 2035 sont plus élevés qu'en 2022 dans l'ensemble des scénarios. Par rapport aux niveaux de référence, les scénarios de subventions entraînent une augmentation de 1 à 4 % des gains cumulés (2023-2035), tandis que l'application de la norme VZE les fait diminuer de

7,5 %. Par ailleurs, lorsque cette dernière entre en jeu, les profits des constructeurs automobiles augmentent tout de même de 15 % entre 2022 et 2035. Le scénario alliant la norme VZE et l'octroi de subventions ne réduit les bénéfices cumulés que de 4,2 %, ce qui atténue de façon efficace l'impact de la norme VZE.

4. Marge bénéficiaire du véhicule[3] : Dans l'ensemble des scénarios, on observe les marges bénéficiaires des VZE augmenter progressivement de 2023 jusqu'en 2035, au fur et à mesure des avancées technologiques. La norme VZE incite les entreprises à abaisser la marge bénéficiaire moyenne des VZE pour atteindre 18 % - comparativement à la marge bénéficiaire moyenne de 25 % des prix de référence durant la même période. En revanche, les scénarios axés sur les subventions entraînent une augmentation de 27 % de la marge bénéficiaire moyenne des prix des VZE au cours de ce laps de temps (les subventions accordées étant accaparées en partie par le constructeur automobile et le concessionnaire). La norme VZE entraîne une hausse des prix des véhicules à moteur à combustion interne (MCI) conventionnels, tandis que les subventions abaissent légèrement les marges bénéficiaires de ces mêmes véhicules.

Figure ES2 : Émissions nationales de GES des véhicules légers (norme VZE neutre + mélanges de politiques, fourchette d'incertitude avec paramètres pessimistes et optimistes)



5. Prix de vente des VZE : Tous les scénarios stratégiques font en sorte d'abaisser le prix de vente des VZE par rapport aux prix de référence. La norme VZE entraîne une baisse moyenne du prix du véhicule d'environ 7 200 $ par rapport à la période 2023-2035 : il s'agit d'une réduction de 22 % des prix de référence. Lorsqu'une politique de subventions est en place, les

[3] La « marge bénéficiaire » du véhicule est comprise au sens large, soit la différence de pourcentage entre le prix de vente du véhicule et ses coûts de fabrication. Aucune distinction n'est faite entre la part de profits revenant aux constructeurs automobiles, aux concessionnaires ou à d'autres entreprises.

prix des VZE sont réduits d'environ 30 % en moyenne, bien que cet avantage s'évapore en grande partie une fois la subvention fédérale supprimée.

6. Prix de vente des véhicules à MCI : La norme VZE incite les constructeurs automobiles à augmenter le prix moyen des véhicules à MCI de 6 % par rapport au scénario de référence (de 2023 à 2035), de manière à les aider à atteindre les objectifs de vente requis. En revanche, les scénarios de subventions provoquent une réduction moyenne de 1 à 8 % des prix des véhicules à MCI (réductions allant de 200 $ à 2 300 $ par véhicule), et entraînent des réductions plus importantes encore pour l'octroi de subventions à long terme.

7. Investissement des constructeurs automobiles en recherche et développement (R&D) pour les VZE : Les scénarios de subvention n'ont pas une forte incidence sur l'investissement des fabricants automobiles en R&D des VZE. Établir la norme en vue de réduire les coûts à venir des VZE augmente par contre initialement les dépenses annuelles de R&D d'environ 180 % et entraîne plus du double des dépenses cumulées de R&D en matière de VZE entre 2023 et 2035 par rapport aux dépenses de référence.

8. Dépenses de subventions publiques : Chacun des scénarios demande un investissement équivalent à des milliards de dollars publics dans l'horizon temporel modélisé. Ce capital pourvoira à la portion attitrée aux subventions de l'ensemble des politiques (2023-2035, non actualisés). Les scénarios de référence, tout comme ceux incluant une norme VZE, comprennent les subventions en vigueur. Ces simulations exigent environ 2,5 milliards de dollars de dépenses. Lorsque la somme de la subvention nationale est triplée, les dépenses publiques augmentent. Elles atteignent 8 milliards de dollars pour la stratégie axée sur les subventions à court terme, 24 milliards de dollars en ce qui concerne celle à moyen terme et 54 milliards de dollars celle à long terme. Associer une norme VZE et une subvention à plus long terme coûte plus de 80 milliards de dollars en dépenses publiques, principalement en raison du niveau élevé des ventes de VZE (coût multiplié par la subvention par véhicule). Dans les scénarios s'appuyant sur les subventions, le coût des dépenses publiques est de plus de 32 000 $ par véhicule zéro émission supplémentaire vendu, et de plus de 450 $ par tonne d'équivalent CO_2 (éq. CO_2) évitée supplémentaire (les deux valeurs sont conformes aux études publiées).

9. Part de subventions des constructeurs automobiles (incidence)[4] : Dans les trois scénarios s'articulant autour des subventions, les constructeurs automobiles (et potentiellement d'autres secteurs de l'automobile) accaparent 13 à 18 % de la valeur des subventions à l'achat dans le scénario médian (ou 1 à 10 milliards de dollars au cours de la période 2023-2035); la subvention à long terme s'accompagne d'une portion plus importante.

Recommandations politiques

Parmi les deux voies que nous évaluons, celle structurée autour de la norme VZE comporte plusieurs avantages par rapport à une approche durable, à grande échelle, et s'appuyant sur les subventions. Relativement aux scénarios de subventions que nous examinons, la norme VZE permet en particulier de :

[4] L'incidence est définie comme étant la part en pourcentage (%) de la subvention versée aux acheteuses et acheteurs, d'après Muehlegger et Rapson (2018). Les constructeurs automobiles s'approprient ce qu'il reste des subventions. Par exemple, 82 % d'une subvention profitera aux acheteuses et acheteurs, ce qui implique que la part restante de 18 % ira aux constructeurs automobiles.

- Atteindre les objectifs de vente de VZE (ou se rapprocher de l'atteinte de ceux-ci) pour 2026, 2030 et 2035;
- Diminuer de manière plus importante les émissions de GES d'ici 2035;
- Entraîner une réduction d'environ un cinquième du prix de vente moyen des VZE;
- Inciter les constructeurs automobiles nationaux à doubler leurs investissements dans la recherche et développement liés aux VZE;
- Continuer de permettre aux constructeurs automobiles d'engranger des bénéfices globalement à la hausse entre 2022 et 2035;
- Réduire de façon importante les dépenses publiques dirigées vers les subventions.

En revanche, les scénarios de subvention font gagner davantage aux constructeurs automobiles, y compris en décuplant les profits des constructeurs automobiles grâce à la portion des subventions qu'ils s'arrogent. Une plus grande baisse des prix de vente moyens de VZE — environ 30 % — accompagne des subventions importantes en vigueur, bien que cela pourrait éventuellement aussi impliquer une légère baisse des prix des véhicules à MCI.

Enfin, il pourrait y avoir un avantage à combiner la norme VZE et des subventions plus importantes pendant un certain temps. Notre modélisation suggère que cette combinaison de politiques peut réduire les effets d'une norme VZE sur les bénéfices. Parallèlement, cette association est en mesure de soutenir l'atteinte des cibles de vente de VZE, de réduire substantiellement les émissions de GES et d'augmenter les investissements dans la R&D. Toutefois, elle causera l'augmentation des dépenses publiques nécessaires : celles-ci pourront atteindre des dizaines de milliards de dollars ($) si cette combinaison est maintenue jusqu'en 2035.

1. Introduction

En matière de véhicules zéro émission (VZE), le Canada s'est fixé des objectifs ambitieux : qu'ils représentent 20 % des ventes annuelles de véhicules légers d'ici 2026, 60 % d'ici 2030 et 100 % d'ici 2035.[5] Bien que ces objectifs soient décrits comme étant des « cibles obligatoires », on ne sait pas encore quelle politique ou combinaison de politiques sera utilisée pour assurer une telle hausse des ventes. D'après des données recueillies à l'échelle internationale, cela va sans dire que pour atteindre un objectif de ventes de VZE établi à 100 %, il faudra une politique ou une combinaison de politiques plus vigoureuse que celles en vigueur.

Réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) de 40 à 45 % d'ici 2030 (par rapport aux niveaux de 2005) et atteindre la carboneutralité d'ici 2050 au Canada constituent des motivations majeures.[6] Le secteur des transports représente environ 28 à 30 % des émissions de GES au pays.[2] Entre 2005 et 2019, les émissions de ce secteur ont augmenté de 14 % au Canada et de 18 % dans le secteur du transport routier. Les transports connaissent la croissance la plus rapide selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.[3]

Les travaux de modélisation effectués pour le secteur des véhicules légers au Canada indiquent que des mesures plus rigoureuses sont nécessaires pour faire passer les ventes de VZE à 30% de part de marché en 2030 – et ce, malgré l'ensemble de subventions, de mécanismes de prix et de règlements actuellement en place.[4,5] L'atteinte d'un objectif de 100% de ventes de VZE d'ici 2035 nécessitera indiscutablement l'ajout d'une politique ou d'une combinaison de politiques ambitieuse(s).[1]

Ce rapport évalue deux scénarios permettant supposément au Canada d'atteindre ses objectifs de vente de VZE pour 2030 et 2035. D'abord, une norme sur les ventes de VZE – ou « norme VZE » – est analysée ; elle impose aux constructeurs automobiles de vendre une part minimale de VZE, avec des pénalités financières en cas de non-conformité.[6] Depuis son introduction en Californie en 1990, la norme VZE a été mise en place dans plusieurs autres États américains, ainsi qu'en Colombie-Britannique, au Québec et en Chine. Au cours de la dernière année, les normes VZE nord-américaines ont été mises à jour de manière à exiger que la totalité des ventes de véhicules relève de cette catégorie d'ici 2035, y compris en Colombie-Britannique et au Québec. Le rapport explore le potentiel de cette norme, lorsqu'appliquée à l'échelle nationale et suivant une trajectoire d'exigences similaire.

Deuxièmement, on note les subventions à l'achat de VZE, en place dans des pays et des juridictions infranationales partout dans le monde.[7, 8] Les subventions à l'achat de VZE varient généralement de 2 500 $ à 20 000 $ par véhicule, alors que des incitatifs plus importants pourraient stimuler les ventes de VZE de manière efficace.[4, 9-11] Ce type d'incitatifs doit par contre être appliqué pendant une longue période pour générer des impacts durables sur les émissions de GES (si elles ne sont pas accompagnées d'une règlementation stricte) — soit vraisemblablement pendant une décennie ou plus. Généralement, les incitatifs à l'achat sont moins rentables (*cost-efficient*) que les autres politiques et, en raison des effets du resquillage, cela peut exiger jusqu'à 30 000 à 35 000 $ de dépenses publiques pour chaque VZE vendu de plus.[10 ,12] De plus, les fabricants automobiles peuvent ajuster leurs prix pour tirer parti de la subvention d'achat, soit jusqu'à 10 à 20 % de cette somme. En économie, il s'agit du

[5] Gouvernement du Canada (2022), Objectifs des ventes des véhicules zéro émission (VZE) au Canada, URL

[6] Le Canada n'a pas adopté de cibles précises en matière de décarbonisation des véhicules légers. Aux fins de l'analyse, on suppose que l'objectif de réduction des émissions GES pour 2030 est proportionnel pour ce secteur. On suppose également une réduction de 40 % par rapport aux niveaux de 2005.

phénomène connu sous le nom « d'incidence » de la subvention,[13] bien que dans certains cas, ce taux de récupération puisse être inférieur.[14,15]

En résumé, les deux scénarios peuvent avoir des impacts très différents sur les ventes de VZE, les émissions de GES, les constructeurs automobiles et les dépenses publiques ; c'est ce que ce rapport étudie. Les prochaines sections détaillent les objectifs de recherche, le modèle de simulation (*AUM*), les scénarios modélisés ainsi que les résultats.

2. Objectifs de la recherche

L'objectif principal est de simuler les répercussions d'une norme VZE pancanadienne et d'un programme de subventions à l'achat de ces véhicules bonifié, en évaluant les ventes de VZE, les émissions de GES, les dépenses publiques ainsi que les impacts sur les constructeurs automobiles. Plus précisément, l'analyse s'appuie sur les politiques climatiques canadiennes actuelles comme « scénario de référence » (tarification actuelle du carbone, subventions à l'achat de VZE et réglementation). À cet effet, trois types d'ajouts sont modélisés en incluant une mise en œuvre à compter de 2023 :

1. Une norme VZE « stricte » exigeant des parts de vente de VZE de 20 % d'ici 2026, de 60 % d'ici 2030 et de 100 % en 2035.
2. Trois durées possibles pour une « stratégie axée sur les subventions » : Pendant cette période, les sommes offertes par le programme national d'incitatifs appelé iVZE sont triplées (jusqu'à 15 000 $ pour les véhicules électriques à batterie [VEB] et 7 500 $ pour les véhicules hybrides rechargeables [VHR]). Des versions de ce scénario sont modélisées ; elles varient en fonction de la fin de ce programme : en 2026, en 2030 ou en 2035.
3. Combinaison de la norme VZE stricte (voir point 1 ci-dessus) et de la stratégie axée sur les subventions à plus long terme.

Les extrants clés de chaque scénario de politiques sont présentés, y compris ceux-ci :

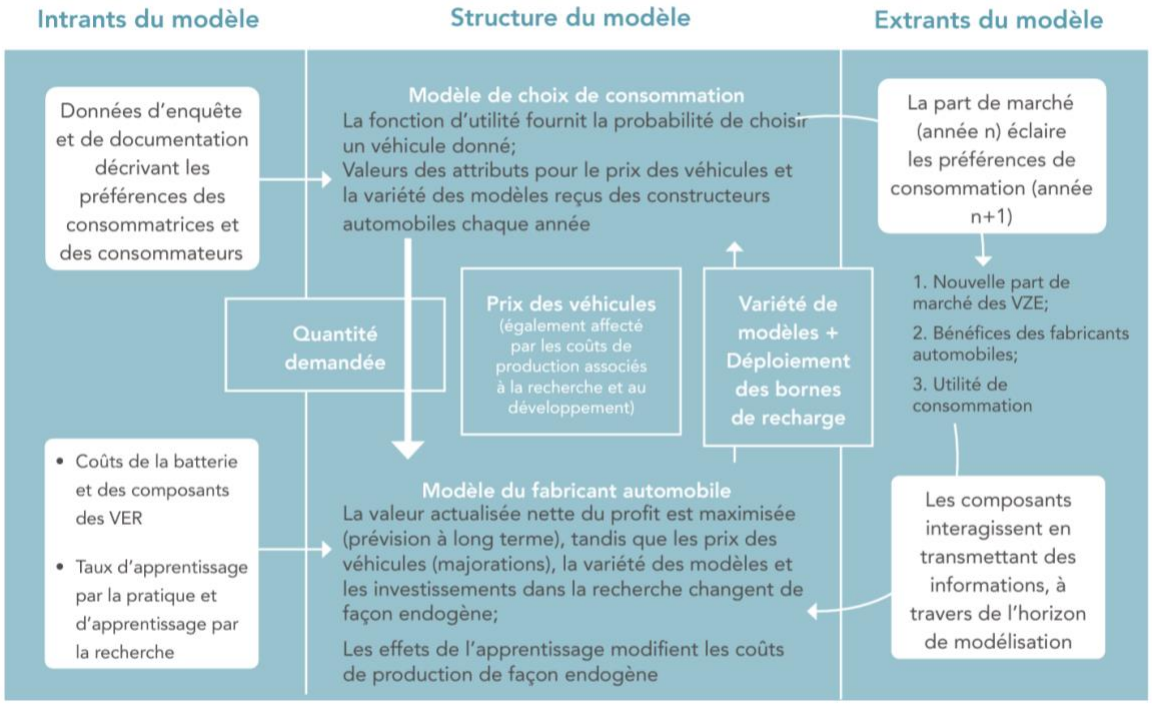
- La part de marché des VZE du Canada pour les véhicules légers neufs (2020-2035) ;
- Les émissions de GES provenant du parc de véhicules légers du Canada (2020-2035) ;
- Les profits des constructeurs automobiles (2020-2035) ;
- Les marges bénéficiaires et le prix de vente des VZE et des véhicules à moteur à combustion interne (MCI) (2020-2035) ;
- Les investissements induits en VZE par les constructeurs automobiles (2020-2035);
- Les dépenses publiques directes en subventions (2023-2035), ainsi que :
    - Les coûts en dollars des dépenses en subventions par VZE supplémentaire vendu;
    - Les coûts en dollars des dépenses en subventions par tonne supplémentaire de GES évitée;
- L'incidence des subventions, soit le pourcentage de celles-ci récupéré par les consommateur(trice)s par rapport à la portion recouvrée par les constructeurs automobiles (2020-2035).

Pour chacune des simulations, une analyse de l'incertitude a été menée : chaque scénario stratégique est simulé à l'aide d'hypothèses de paramètres de valeur « médiane », ainsi que des valeurs « pessimistes » et « optimistes ».

3. AUtomaker-Consumer Model (*AUM*)

Le modèle AUtomaker-Consumer Model (AUM) est utilisé pour simuler les répercussions de ces politiques sur le secteur canadien des véhicules légers. 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 constructeurs automobiles cherchant à maximiser les profits comme le démontre la Figure 1. Plus précisément, le constructeur — ou l'offre de véhicules — modèle et la personne consommatrice modèle interagissent par transfert de données pour chacune des années modélisées. Le modèle AUM représente de façon endogène la prévision pluriannuelle d'un constructeur automobile 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) les investissements en recherche et développement (R&D) dans le but de réduire les coûts futurs des VZE.

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



À titre d'exemple, le constructeur automobile modèle 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 gaz à effet de serre (GES) des véhicules légers sur toute leur durée de vie.

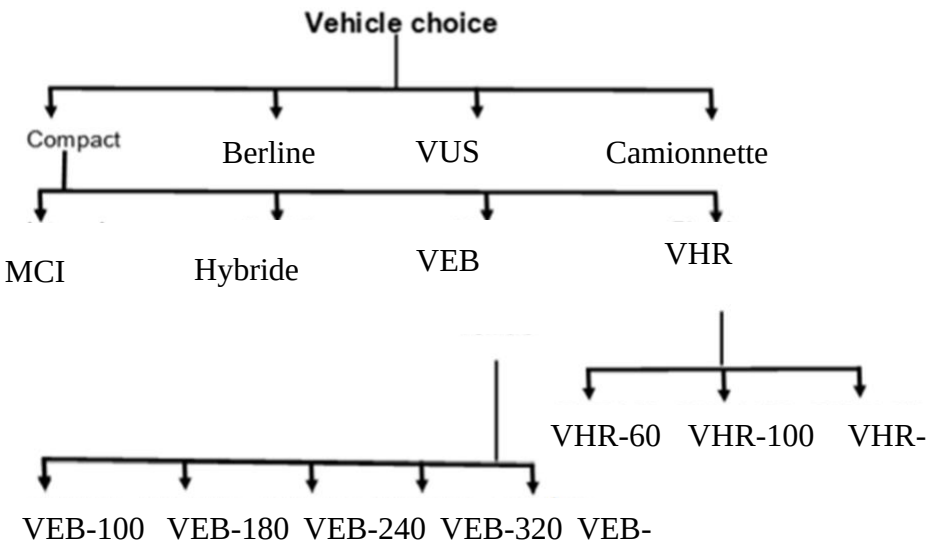
Les sous-sections suivantes résument les modèles d'« offre » et de « demande », la méthode utilisée pour calculer les coûts des politiques et le processus de validation utilisé pour calibrer le modèle *AUM*.

3.1 Modélisation de 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 constructeur automobile modèle à l'aide de l'élasticité-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, pour satisfaire leur demande de véhicules neufs, les consommatrices et les consommateurs choisissent parmi les options disponibles, ce qui génère des ventes annuelles de véhicules légers. Ces derniers sont divisés en quatre catégories : les véhicules à MCI, les véhicules hybrides, les VHR et les VEB.

Le modèle de consommation est un modèle de choix discrétionnaire à niveaux multiples (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*



Les consommatrices et consommateurs choisissent la technologie de véhicule qui leur est la plus profitable selon son utilité. Cette fonction indique l'utilité à la consommation tirée de la technologie du véhicule i, et elle s'inspire en grande partie du modèle LAVE-Trans. 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 annuels liés à l'utilisation 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 constitue le pourcentage de stations de ravitaillement avec recharge électrique par rapport aux stations-service classiques.

La variété des modèles, exprimée sous forme de logarithme naturel du pourcentage de modèles par rapport aux véhicules conventionnels, 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 représentant la variété de modèles est donnée par le logarithme du ratio (*nj/N)*, N étant le nombre de modèles de véhicules conventionnels. Par exemple, en 2020, il y avait seulement 28 modèles de VHR au Canada, comparativement à environ 300 pour les véhicules classiques. Ainsi, pour l'année 2020, la variété des modèles de VHR correspond à environ 10 % des véhicules classiques.

L'*Alternative Specific Constant* (ASC) constitue la composante de l'utilité qui n'a pas été saisie par d'autres attributs.

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

$$P_{i|j}(MS) = \frac{e^{U_i}}{\sum_{k=1}^{n} e^{Uk}} \qquad (2a)$$

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

Des sources de données empiriques sont utilisées pour alimenter l'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 majoritairement tirés de données empiriques provenant des sondages de la *Canadian Plug-in Electric Vehicle Study* (CPEVS) et de la *Canadian Zero Emissions Vehicle Study* (CZEVS) ainsi que, dans une moindre mesure, de la littérature internationale. Le Tableau 1 présente la volonté des consommatrices et des consommateurs à payer pour les différents attributs pour l'année de référence. La CPEVS comprenait une enquête en trois parties, menée par un échantillon représentatif de 1 754 ménages canadiens qui ont acheté un véhicule neuf en 2013, tandis que la CZEVS est essentiellement une version plus récente de cette enquête; elle a été réalisée en 2017. Ces deux études contiennent des réponses aux questions de sondage sur la sensibilisation aux VZE, la distance de conduite hebdomadaire, la classe souhaitée pour son prochain véhicule et les préférences quant aux caractéristiques des véhicules. Le modèle de choix des classes latentes a été utilisé pour créer cinq catégories de consommatrices et consommateurs hétérogènes dans l'échantillon des deux enquêtes et dont il est question plus loin.

Tableau 1. Liste des attributs et la valeur associée à la volonté de payer (VDP) de leurs coefficients respectifs

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 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 le dynamisme dans les 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 :

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

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).

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 de la recharge, tableau 2) ou endogène en tant qu'intrants du constructeur automobile modèle. Comme le montre la Figure 1, les valeurs exprimant les prix d'achat des véhicules et la variété des modèles sont tirées du constructeur automobile modèle de manière endogène. Cependant, la variété de modèles comprend aussi une composante exogène, servant à représenter l'augmentation du nombre de modèles à l'échelle mondiale. Les hypothèses exogènes concernant la variété des modèles sont également énumérées au tableau 2.

Pour représenter l'hétérogénéité des préférences de consommation, trois groupes de consommatrices et de consommateurs sont inclus : « Enthousiasme pour les VZE » (15 % des personnes consommatrices), « Démocratisation » (50 %) et « Résistance face aux VZE » (35 %). Ces divisions proportionnelles sont exogènes et constantes à travers l'horizon temporel de la modélisation. Les dynamiques dans les préférences sont plutôt représentées par des changements dans l'ASC pour un segment donné. Comme on l'a vu, ces trois groupes sont tirés des cinq catégories de consommateurs et consommatrices identifiées dans des études antérieures auprès du public canadien. Premièrement, les personnes démontrant de l'enthousiasme pour les VZE ont une vision très positive (aversion pour le risque négative) des VZE. Les personnes formant le segment « Résistance » privilégient les véhicules conventionnels et perçoivent les VZE de manière très négative. La troisième catégorie, « Démocratisation », rassemble les personnes démontrant un biais initial modéré contre les VZE.

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

	2020	2022	2023	2030			2035			Source
Paramètres	**Valeurs**			**Médian**	**Optimiste**	**Pessimiste**	**Médian**	**Optimiste**	**Pessimiste**	
Variété des modèles (par rapport aux véhicules à MCI)	10 %	20 %	25 %	70 %	90 %	40 %	100 %	100 %	60 %	Jugement des auteurs
Accès à la recharge (% par rapport aux stations-service)	10 %	15 %	20 %	70 %	90 %	50 %	100 %	100 %	60 %	Jugement des auteurs
Prix de l'essence ($ CA/litre, à l'exclusion du prix du carbone)	0,83	1,78	1,6	1,02	1,70	0,70	0,65	1,70	0,51	Office national de l'énergie[24], EIA des États-Unis[25], EIA[26]; Knuemo[27] Citation de l'EIA
Coût des batteries ($/kWh en 2020)	230	180	180	110	70	130	70	40	100	Lutsey et coll.[28]; AIE[29]; Bloomberg[30]
Élasticité du prix à la consommation pour l'achat d'un véhicule (2020-2035)	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,3	-1	-0,6	-0,3	-1	Fouquet [31]; Holmgren [32]
Élasticité de la demande en transport des consom. (2020-2035)	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,15	-0,25	-0,2	-0,15	-0,25	Small et van Dender [33]
Vitesse d'apprentissage des constructeurs automobiles (%) (2020-2035)	8	8	8	8	10	6	8	10	6	Weiss et coll. [34]; Barreto et Kypreos [35]
Taux d'actualisation des constructeurs automobiles (%) (2020-2035)	10	10	10	10	8	15	10	8	15	Jagannathan et coll. [36]
Taux de remplacement du parc de véhicules (%) (2020-2035)	7	7	7	7	10	5	7	10	5	Office national de l'énergie[24]; jugement des auteurs

3.2 Modélisation de 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 vise à explorer les répercussions globales des politiques à l'échelle de l'industrie plutôt que les répercussions sur des constructeurs automobiles particuliers.

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 la 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 complet, soit jusqu'en 2035, à l'heure actuelle) et prend plusieurs décisions relatives à toutes les technologies de transmission, notamment :

1. Les investissements en recherche et développement, ce qui inclut tous les coûts d'investissements (p. ex. capital et main-d'œuvre) : cela peut contribuer à réduire les coûts des VZE à l'échelle nationale au fil du temps, en plus de la baisse exogène mondiale des coûts des batteries et d'autres composantes;
2. Le nombre de modèles de VZE disponibles à la vente;
3. Le déploiement des bornes de recharge, où le fabricant automobile contribue partiellement et de façon endogène à l'infrastructure de recharge; et
4. Les prix de tous les véhicules vendus, où 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 :

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

Où $Q_{tk}(P_{tk}, n_{ctk}, CA_{ctk})$ représente la quantité de chaque type de véhicule *k* produit pendant une certaine durée t^{th} et la quantité est fonction du prix P_{tk}, et le nombre de modèles n_{ctk} du type de véhicule *k*. n_{ctk} est 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 d'opportunité du capital pour les entreprises privées. Le constructeur automobile ajuste donc P_{tk}, $n_{ctk,}$ CA_{ctk}et C_{Itk} dans l'équation (4) de manière à maximiser les profits. On suppose que la quantité de véhicules produits pour chaque type est égale à la quantité demandée dans ce modèle de choix de consommation. L'inclusion d'une réaction 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 liés aux coûts ($C_{Ptk}, C_{Rtk}, C_{Itk}$); ils sont tous décrits brièvement ci-dessous.

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 :

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

Où C_{0tk} est 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*.

Tableau 3. Paramètres exogènes utilisés dans le constructeur modèle

Paramètres	**Valeurs**	**Sources**
Paramètre de mise à l'échelle, *a* (équation 5) véhicules conventionnels (VC)	0,01	Jugement des auteurs, fondé sur le calibrage du modèle en fonction de la part de marché réelle des VC en 2020
Paramètre de mise à l'échelle, *a* (équation 5) VEB	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 des VEB en 2020
Capacité cumulative, VC en 2020	25 millions	Statistique Canada (2020)
Capacité cumulative, VEB en 2020	100 000	Statistique Canada (2020)
Stock de connaissances, VC en 2020	500 G$	Calcul des auteurs; fondé sur Barreto et Kypreos (2004)
Stock de connaissances, VEB en 2020	3 G$	Calcul des auteurs; fondé sur Barreto et Kypreos (2004)

Le deuxième terme associé aux coûts de l'équation (4), C_{Rtk}, indique les coûts totaux de la mise en œuvre de la politique. La norme sur les ventes de VZE — ou norme VZE — et les normes d'émissions de GES des véhicules sont modélisées dans le cadre de la fonction de la rentabilité. Le coût de la réglementation associée à la norme VZE est ensuite modélisé comme suit : $\rho_{ZEV} * (\emptyset_{ZEV} * Q_{Total} - Q_{ZEV})$, où ρ_{ZEV} représente la pénalité par crédit VZE manquant pour atteindre le quota fixé, $\emptyset_{ZEV}$ est le minimum de crédits VZE requis par ce 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 $\rho_{FE} * Q_k * (Z_{FE} - Z_k)$, où ρ_{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*. Le coût total de la réglementation est représenté comme suit :

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

Le troisième élément inclus dans le coût de l'équation (4), présentée plus tôt, est C_{Itk} : il représente les investissements en R&D des constructeurs automobiles canadiens. Le coût de production (C_{0tk} dans l'équation 5) des véhicules produits au Canada peut être en partie influencé par les investissements en recherche, C_{Itk}, effectués par les constructeurs automobiles à l'échelle nationale au fil du temps (ce qui exclut la baisse exogène des coûts des véhicules qui est attribuable aux efforts mondiaux), comme suit :

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

Le coût de production de chaque technologie de transmission, $\boldsymbol{C_{0tk}}$, comporte 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 ©$_k$ 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 $\boldsymbol{C_{0tk}}$ au moment *t* est influencé de façon endogène par le coût de production de l'année précédente $\boldsymbol{C_{0t-1,k}}$, par la capacité cumulative $\boldsymbol{CC_{t-1k}}$ (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'investissements cumulatifs en R&D au Canada) atteint jusqu'à la période *t-1*.

Ainsi, alors que, d'une part, les investissements en recherche augmentent les coûts actuels des fabricants automobiles, d'autre part, ces investissements réduisent potentiellement les coûts de production futurs. Pour optimiser ses activités dans son horizon de planification, le constructeur peut faire un compromis entre l'augmentation des coûts de recherche actuels et les bénéfices découlant de la baisse des coûts de production à une date ultérieure. Les valeurs des dépenses d'investissement initiales, du stock de connaissances initial, de la capacité cumulative initiale, de l'apprentissage par la pratique et de l'apprentissage par la recherche sont précisées de façon exogène dans le modèle (Tableau 3).

3.3 Calcul des émissions de GES

Nous suivons plusieurs étapes supplémentaires pour calculer les émissions totales de GES des véhicules légers. Le stock total de véhicules et leur utilisation sont calculés, puis des valeurs de GES sont attribuées 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 :

$$\sum_{k=1}^{N} S_{t+1,k} = \sum_{k=1}^{N} S_{t,k}\,(1\text{-}d_{t,k}) + \sum_{k=1}^{N} Q_{t,k} \qquad (8)$$

Où $d_{t,k}$ représente le taux de rotation 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 la demande en transport) dépend du coût du carburant. Une augmentation du coût du carburant (p. ex., en raison d'une taxe) peut réduire la demande en transport, tandis qu'une réduction du coût du carburant (p. ex., en raison de l'amélioration de l'efficacité énergétique) 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. Le Tableau 2 illustre l'élasticité de la demande en transport. L'utilisation du véhicule dans un contexte d'ajout d'une politique (V_p) est fonction de la demande en transport prévue dans le scénario de référence (V_0), qui ne comprend pas de politique additionnelle, du paramètre d'élasticité (*e*) et des fluctuations du coût du carburant dans le scénario de référence :

$$V_p = V_0 \left(\frac{fuel\ cost_P}{fuel\ cost_0}\right)^e \qquad (9)$$

Où $fuel\ cost_P$ est le coût du carburant avec une ou des politique(s) supplémentaire(s), tandis que $fuel\ cost_0$ est le coût du carburant dans le scénario de référence, soit sans nouvelle politique. D'après des données de Statistique Canada, on suppose que la distance parcourue par véhicule (V_0) au Canada est de 16 000 kilomètres par année.

Une fois que les valeurs associées au stock de véhicules et à leur utilisation sont connues, on peut obtenir les émissions totales de GES en multipliant le produit de ces deux valeurs par la consommation d'énergie par véhicule et l'intensité 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. Dans le cas des VHR, nous supposons que les consommatrices et les consommateurs ont recours à 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. 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 à la fois en fonction de l'autonomie électrique et du 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 entourant l'intensité énergétique et l'intensité carbone du carburant des véhicules au Canada

	2020	**2035**	**Source**
Intensité énergétique des véhicules			
Conventionnel (L/100 km)	7,55	5,73	Office national de l'énergie (2019), EIA (2020)
VHR (L/100 km : 30 % essence)	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 carbone (gCO_2/MJ)			
Essence (avec la Norme sur les combustibles propres)	88,1	76	Gouvernement du Canada (2021)
Électricité	19,5	14	Office national de l'énergie (2019); GHGenius

Le Tableau 4 résume également nos hypothèses exogènes au sujet de l'intensité des émissions de carbone « du puits à la roue » pour chaque source d'énergie, qui comprend les GES émis lors de la production et du transport de cette énergie jusqu'au moment où elle arrive dans un véhicule pour y être consommée au Canada, selon le modèle GHGenius (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 raison de la norme sur les combustibles propres. Pour l'électricité, on suppose que la contribution des sources d'énergie

renouvelables à faibles émissions de carbone pour la produire 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.

3.4 Analyse de l'incertitude

Deux étapes principales ont été réalisées pour explorer et décrire l'incertitude des résultats : (i) l'identification de paramètres clés (énumérés ci-dessous) qui causent le plus d'incertitude dans les extrants du modèle; et (ii) la présentation de certains résultats sous forme de fourchettes d'incertitude proposant des hypothèses de valeurs pessimistes et optimistes des paramètres intrants déterminant les limites de ces fourchettes. L'effet des estimations pessimistes et optimistes provenant de la littérature a été testé (les valeurs 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** : Si l'on prend la perspective des constructeurs automobiles (ce qui inclut les marges bénéficiaires des fabricants de batteries), les batteries coûtaient 230 $/kWh en 2020, et 180 $/kWh en 2022 et en 2023.[29,30] La hausse des prix observée en 2022 et 2023 reflète les problèmes actuels de la chaîne d'approvisionnement des batteries automobiles de pointe. Les rapports de l'industrie laissant entendre qu'il s'agit d'un problème temporaire qui pourrait être résolu d'ici 2023, nos hypothèses s'appuient sur la trajectoire à long terme de la baisse du prix des batteries en 2024. Il faut tenir compte d'un retard de deux ans par rapport aux estimations précédentes. Autrement dit, au lieu d'anticiper que le prix des batteries atteindra 50 $/kWh en 2030 (comme nous l'avons supposé dans notre plus récent rapport à l'aide du modèle *AUM*)[39], nous prévoyons maintenant que l'indice de référence sera atteint deux ans plus tard, en 2032. Nous supposons des valeurs de 40 $/kWh (optimiste) et de 100 $/kWh (pessimiste) en 2035 en ce qui a trait à l'incertitude. [29] Ces données sont semblables à celles obtenues par Lutsey et coll.[28]
2. **Élasticité-prix de la demande** : Elle détermine la façon dont la possession d'un véhicule est affectée par les prix des véhicules; elle suppose des valeurs de -0,3 (optimistes) et de -1 (pessimistes), ce qui correspond aux valeurs faibles et élevées suggérées dans la littérature.
3. **Taux d'actualisation** utilisé par le constructeur automobile : Il suppose des valeurs de 8 % (optimistes) et de 15 % (pessimistes), ce qui correspond aux valeurs faibles et élevées suggérées dans Jagannathan et coll. (2016).
4. **Prix du carburant** (essence, excluant toute taxe carbone) : Le prix du litre d'essence qui est considéré comme étant à 0,83 $ en 2020, 1,78 $ en 2022 et 1,60 $ en 2023. Pour 2035, une fourchette de prix allant de 0,65 $ à 1,70 $ par litre est incluse.
5. **Préférences de consommation** : Elles 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 $, qui fluctue entre -20 000 $ et 0 $ selon des conditions pessimistes ou optimistes en 2035.
6. **Augmentation mondiale exogène de la variété de modèles** pour les VZE : Elle devrait passer de 10 % en 2020 (par rapport à la disponibilité des modèles pour les véhicules conventionnels) à 60 % (pessimiste) et 100 % (optimiste) en 2035.

7. **Accès à la recharge** : Il 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, alors que les valeurs de 2030 sont de 70 % dans le scénario médian, 50 % dans le scénario pessimiste et 90 % dans le scénario optimiste. Les valeurs pour l'année 2035 vont de 60 % (pessimiste) à 100 % (médian et optimiste).
8. **Vitesse d'apprentissage des constructeurs** à l'échelle canadienne : Dans le cadre du modèle *AUM*, elle détermine le rythme auquel la technologie s'améliore au Canada, ce qui a une influence (en plus des efforts mondiaux) sur 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 à l'augmentation des investissements en R&D au Canada (apprentissage par la recherche) (voir l'équation 8 pour référence). Comme on suppose qu'une partie de la baisse du coût des véhicules est exogène (en raison de facteurs mondiaux), on présume que cette vitesse d'apprentissage est la vitesse nationale. Ce paramètre suppose des valeurs de 6 % (scénario pessimiste) et de 10 % (scénario optimiste), soit plus ou moins 25 % par rapport à la valeur médiane de 8 %. Ces valeurs sont constantes entre 2020 et 2035.
9. **Taux de rotation des stocks** : Il 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. **Élasticité de la demande** des véhicules-kilomètres parcourus (VKP) : Elle détermine la façon dont la demande en transport est affectée par les coûts du carburant et suppose des valeurs entre -0,15 (optimiste) et -0,25 (pessimiste) entre 2020 et 2035.
11. **Intensité carbone de l'essence** (en g d'éq. CO_2/MJ) : Elle rend compte de la norme 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).

Les paramètres sont tirés de la littérature scientifique, et le rendement du modèle est harmonisé avec les ventes actuelles et les prévisions d'autres modèles et études. L'incertitude est représentée en effectuant une analyse de l'incertitude avec les paramètres « optimistes » et « pessimistes » vis-à-vis de l'adoption des VZE. Des fourchettes d'incertitude sont ainsi proposées pour les extrants clés de la modélisation.

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.

4. Scénarios de politiques

Notre analyse comprend un total de 6 scénarios. Le premier est le **scénario de référence** comprenant uniquement les politiques actuelles.

Bien que chaque province ne soit pas représentée dans le modèle *AUM*, nous dépeignerons certaines politiques provinciales en vigueur, comme la norme VZE en Colombie-Britannique et au Québec. Plus précisément, les politiques actuelles sont :

- La taxe sur le carbone : 50 $ en 2022, soit une augmentation de 15 $ par année jusqu'à atteindre 170 $ en 2030, montant qui demeurera stable jusqu'en 2035.

- La Norme sur les combustibles propres : elle reflète le règlement sur les combustibles propres présentée au début de juillet 2022. Dans le cadre de cette norme, l'intensité des émissions de carbone des combustibles liquides sera réduite de 3,5 g d'éq. CO_2/MJ en 2023, les réductions augmentant pour atteindre 14 g d'éq. CO_2/MJ d'ici 2030 (c.-à-d. l'intensité des émissions de carbone du stock d'essence = 93,9 g d'éq. CO_2/MJ en 2021 et 2022; 91,5 en 2023; 81 g d'éq. CO_2/MJ en 2030).[7] Nous tenons également compte de la norme sur les carburants à faible teneur en carbone de la Colombie-Britannique, qui est plus rigoureuse que la Norme sur les combustibles propres d'ici 2030 (76 g d'éq. CO_2/MJ). En ayant ceci à l'esprit, l'exigence totale à l'échelle du Canada serait de 80,5 g d'éq. CO_2/MJ).
- La norme VZE : Les normes provinciales en matière de VZE sont exprimées en équivalents à l'échelle nationale (en mettant à jour celles-ci pour qu'elle atteigne à 100 % en 2035 en Colombie-Britannique et au Québec). Au Canada, cela équivaut à une norme VZE de 21 % en 2030 et de 36 % en 2035.
- Les incitatifs à l'achat : Les incitatifs à l'achat de VZE à la fois du Canada et des provinces sont inclus, tant au niveau des montants estimés que de la durée prévue (et la moyenne pondérée de la population totale du Canada). Ces nombres figurent dans les tableaux 5a et 5b.
- Le déploiement des infrastructures de recharge : Il est supposé que 70 % des personnes conductrices auront accès à des bornes de recharge d'ici 2030, bien que l'analyse de l'incertitude considère que cet accès varie entre 50 % et 90 %. En 2035, les valeurs varient de 60 % (pessimiste) à 100 % (médian et optimiste).
- Les normes sur les émissions des véhicules : À la suite des récentes normes annoncées par Biden, l'échéancier (dans lequel les valeurs de 2026 sont constantes jusqu'à la fin de la période de modélisation, en 2035) est le suivant :

    - 2020 : 140 g d'éq. CO_2/km
    - 2021 : 134 g d'éq. CO_2/km
    - 2022 : 132 g d'éq. CO_2/km
    - 2023 : 119 g d'éq. CO_2/km
    - 2024 : 113 g d'éq. CO_2/km
    - 2025 : 107 g d'éq. CO_2/km
    - 2026-2035 : 102 g d'éq. CO_2/km (à compter de cette année-là, l'économie « efficace » de carburant demeure constante pour les véhicules autres que les VZE).

Ensuite, une **« norme stricte en matière de VZE » :** à cette référence, nous ajoutons une norme VZE en 2023, à savoir :

- Conformité annuelle aux cibles de ventes de VZE établis par le gouvernement fédéral pour les véhicules légers : 20 % d'ici 2026, 60 % d'ici 2030 et 100 % d'ici 2035
- Pénalité en cas de non-conformité : 20 000 $ par crédit
- Système de crédits :
    - VEB vendu : 1 crédit (tous types d'autonomie)
    - VHR vendu : 0,5 crédit
        - Maximum de 10 % de crédits autorisés pour les VHR entre 2023 et 2029

[7] Voir les paramètres dans le tableau 1 de ce document.

        - Aucun crédit n’est accordé pour les VHR entre 2030 et 2035
    - Les fabricants automobiles peuvent accumuler des crédits pendant un maximum de 3 ans.

Trois durées sont ensuite étudiées pour la **« stratégie axée sur les subventions ».** Pendant ces périodes**,** les sommes du programme national d’incitatifs pour les VZE, nommé iVZE, sont triplées. Ces programmes offrent jusqu’à 15 000 $ pour les VEB ainsi que pour les VHR dont l’autonomie est supérieure à 50 km.

- À court terme : 2023-2026 (ce qui peut être désigné comme le scénario « Élimination progressive grâce à la parité des prix »)
- À moyen terme : 2023-2030
- À plus long terme : 2023-2035

Enfin, un scénario qui allie la norme stricte de VZE avec la stratégie axée sur les subventions « à plus long terme » décrite dans le paragraphe précédent est proposé.

Tableau 5a. Subventions à l'achat de VEB présumées dans le scénario de référence (pondération selon les ventes de véhicules par région)

Juridiction	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027-35	Sources
Canada	5 000 $	5 000 $	5 000 $	5 000 $	5 000 $	5 000 $	5 000 $	0	https://tc.canada.ca/fr/transport-routier/technologies-novatrices/vehicules-zero-emission/vehicules-legers-zero-emission/programme-incitatifs-vehicules-zero-emission
Colombie-Britannique	3 000 $	3 000 $	3 000 $	3 000 $	3 000 $			0	https://goelectricbc.gov.bc.ca/
Québec	7 000 $	7 000 $	7 000 $	7 000 $	7 000 $	7 000 $	7 000 $	0	https://vehiculeselectriques.gouv.qc.ca/rabais/ve-neuf/programme-rabais-vehicule-neuf.asp
Nouvelle-Écosse	3 000 $	3 000 $	3 000 $	3 000 $				0	https://evassist.ca/rebates/
Nouveau-Brunswick			5 000 $	5 000 $				0	https://www.nbpower.com/fr/products-services/electric-vehicles/plug-in-nb/electric-vehicle-rebates/
Île-du-Prince-Édouard	3 750 $	3 750 $	5 000 $	5 000 $				0	https://www.princeedwardisland.ca/fr/information/environnement-energie-et-action-climatique/electric-vehicle-incentive
Terre-Neuve-et-Labrador	2 500 $	2 500 $	2 500 $	2 500 $				0	https://nlhydro.com/electric-vehicles/ev-rebate/
Yukon	4 000 $	4 000 $	5 000 $	5 000 $				0	https://yukon.ca/fr/driving-and-transportation/apply-rebate-new-zero-emission-vehicle
Total pondéré	7 195 $	7 195 $	7 255 $	7 255 $	7 118 $	6 695 $	6 695 $		

Tableau 5b. Subventions à l'achat de VHR présumées dans le scénario de référence (pondération en fonction des ventes de véhicules par région)[8]

Juridiction	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027-35	
Canada	5 000 $	5 000 $	5 000 $	5 000 $	5 000 $	5 000 $	5 000 $	0	https://tc.canada.ca/fr/transport-routier/technologies-novatrices/vehicules-zero-emission/vehicules-legers-zero-emission/programme-incitatifs-vehicules-zero-emission
Colombie-Britannique	3 000 $	3 000 $	3 000 $	3 000 $	3 000 $			0	https://goelectricbc.gov.bc.ca/
Québec	5 000 $	5 000 $	2 500 - 5 000 $	2 500 - 5 000 $	2 500 - 5 000 $	2 500 - 5 000 $	2 500 - 5 000 $	0	Remarque : 2 500 $ pour <15kWh, sinon 5 000 $ https://vehiculeselectriques.gouv.qc.ca/rabais/ve-neuf/programme-rabais-vehicule-neuf.asp
Nouvelle-Écosse	3 000 $	3 000 $	3 000 $	3 000 $				0	https://evassist.ca/rebates/
Nouveau-Brunswick			5 000 $	5 000 $				0	https://www.nbpower.com/fr/products-services/electric-vehicles/plug-in-nb/electric-vehicle-rebates/
Île-du-Prince-Édouard	3 750 $	3 750 $	2 500 $	2 500 $				0	https://www.princeedwardisland.ca/fr/information/environnement-energie-et-action-climatique/electric-vehicle-incentive
Terre-Neuve-et-Labrador	2 500 $	2 500 $	1 500 $	1 500 $				0	https://nlhydro.com/electric-vehicles/ev-rebate/
Yukon	4 000 $	4 000 $	5 000 $	5 000 $				0	https://yukon.ca/fr/driving-and-transportation/apply-rebate-new-zero-emission-vehicle
Total pondéré (<15 kWH)	6 711 $	6 711 $	6 104 $	6 104 $	5 951 $	5 606 $	5 606 $		
Total pondéré (>15 kWH)	6 711 $	6 711 $	6 712 $	6 712 $	6 556 $	6 211 $	6 211 $		

[8] Les VHR modélisés par le modèle AUM possèdent tous une « plus grande autonomie » selon la définition fédérale (60 à 120 km).

5. Résultats et discussion

Les tableaux 6 et 7 résument plusieurs extrants clés associés à chacun des scénarios étudiés. Ces tableaux n'affichent que des extrants médians, qui ne tiennent pas compte des fourchettes d'incertitude indiquées à la section 3.5. Ils survolent les répercussions de chaque scénario et des contreparties associées au fait de choisir l'un ou l'autre. Les sections suivantes décriront en détail les résultats en ce qui concerne les ventes de VZE, les émissions de GES, les répercussions sur les constructeurs automobiles (profits, marges bénéficiaires, prix de vente et investissement en recherche et développement) et les dépenses liées aux subventions.

5.1 Ventes de VZE

La figure 2a présente les résultats de la nouvelle part de marché de VZE au sein du scénario de référence, dans la norme VZE et dans trois scénarios basés sur les subventions. La figure 2b illustre séparément le scénario alliant la norme VZE et la subvention à long terme. Chaque zone ombrée représente l'analyse d'incertitude décrite à la section 3.5. Dans ce cas, la limite supérieure des ventes de VZE respecte les hypothèses de paramètres des valeurs « optimistes », et la limite inférieure est simulée à l'aide des hypothèses des valeurs « pessimistes ». Le tableau 6 résume les résultats médians associés aux nouvelles parts de marché des VZE pour chaque scénario associé aux années pour lesquelles le gouvernement du Canada s'est doté de cibles de ventes de VZE dans son Plan de réduction des émissions (2026, 2030 et 2035).

De toute évidence, le scénario stratégique actuel de « référence » ne suffit pas pour atteindre les objectifs de vente de VZE en 2026, 2030 ou 2035. Ces politiques n'ont permis d'obtenir une nouvelle part de marché équivalent à environ 15 à 17 % en 2026 (16 % en moyenne), de 23 à 27 % en 2030 (25 % en moyenne) et de 35 à 43 % en 2035 (39 % en moyenne).

Tableau 6. Nouvelle part de marché des VZE associée à chaque scénario (scénario médian)

	2026	2030	2035
Cibles de ventes de VZE fixées dans le Plan de réduction des émissions	20 %	60 %	100 %
Référence	16 %	25 %	39 %
Norme VZE	25 %	59 %	98 %
Subvention (court terme)	20 %	29 %	47 %
Subvention (moyen terme)	20 %	34 %	54 %
Subvention (long terme)	20 %	36 %	65 %
+ Norme VZE + subvention (long terme)	25 %	59 %	98 %

Par rapport au scénario de référence, les trois scénarios axés sur les subventions ont entraîné une augmentation annuelle des ventes de VZE dans les années suivant 2023 – c'est l'année à partir de laquelle le budget des subventions fédérales a été multiplié par trois. Toutefois, les objectifs de vente de VZE pour 2030 et 2035 ne sont atteints par aucun des scénarios de subventions, même en adoptant des hypothèses optimistes. Le scénario de subventions à court terme (en vigueur jusqu'en 2026) permet d'obtenir des ventes de VZE de 27 à 30 % d'ici 2030, et de 44 à 49 % d'ici 2035. Maintenir ce scénario jusqu'en 2030 fait passer les ventes de VZE en 2030 entre 32 et 36 %, et celles en 2035 entre 51 et 57 %. Prolonger ce scénario jusqu'en

2035 augmente encore les ventes de VZE : celles-ci atteignent 34 à 38 % en 2030 et 62 à 69 % en 2035.

En revanche, le scénario d'adoption d'une norme VZE dépasse l'objectif de ventes de ce type de véhicules en 2026, et atteint ou approche de très près ces cibles pour 2030 et 2035. Les ventes augmentent, passant de 56 à 62 % en 2030 et de 96 à 100 % en 2035. Le fait de conjuguer une norme VZE et un programme de subventions à plus long terme permet d'obtenir un résultat similaire (figure 2b). Cette combinaison mène à des taux de 56 à 61 % de ventes en 2030 et entre 95 à 100 % en 2035.

Tableau 7 : Sommaire des scénarios (scénario médian, tous les prix en dollars canadiens)

		Réf.	+ Norme VZE	+ Subvention (court terme)	+ Subvention (moyen terme)	+ Subvention (long terme)	+ Norme VZE + Subvention (long terme)
Efficacité							
Ventes de VZE	% des nouvelles ventes en 2035	38 %	97 %	47 %	54 %	65 %	98 %
Émissions de GES	2035 Mt	47,3	28,4	46,3	43,5	41,7	28,9
	2022-35 Mt	771	636	756	733	732	643
Répercussions sur les fabricants automobiles							
Profits	2035 G$,	24	19,4	24,5	24,9	25,5	21,0
	2023-35 G$	268	248	270	274	279	257
Marge bénéficiaire du véhicule	(%, 2035) VZE	34 %	22 %	35 %	37 %	39 %	29 %
	(%, 2035) MCI	41%	44%	40%	39%	39%	42%
Prix des VZE	Variation moy. par rapport à la référence (%)		-22 %	-10 %	-20 %	-31 %	-28 %
	Variation moy. par rapport à la référence ($)		-7 241 $	-3 673 $	-6 742 $	-9 942 $	-8 942 $
Prix des véhicules à MCI	Variation moy. par rapport à la référence (%)		+6,1 %	-0,7 %	-3,4 %	-7,8 %	+2,5 %
	Variation moy. par rapport à la référence ($)		+1 876 $	-222 $	-1 032 $	-2 347 $	+702 $
Investissement en R&D	2023-35 G$	3,3	6,9	3,3	3,4	3,5	5,8
Détails de la subvention							
Dépenses publiques	2023-35 G$	2,5	2,5	8,1	24,1	54,1	82,3
Part capturée par les constructeurs automobiles	2023-35 (%)	10 %	10 %	13 %	14 %	18 %	14 %

Figure 2a. Part de marché pour les VZE dans les ventes de véhicules neufs (politiques individuelles, fourchette d'incertitude)

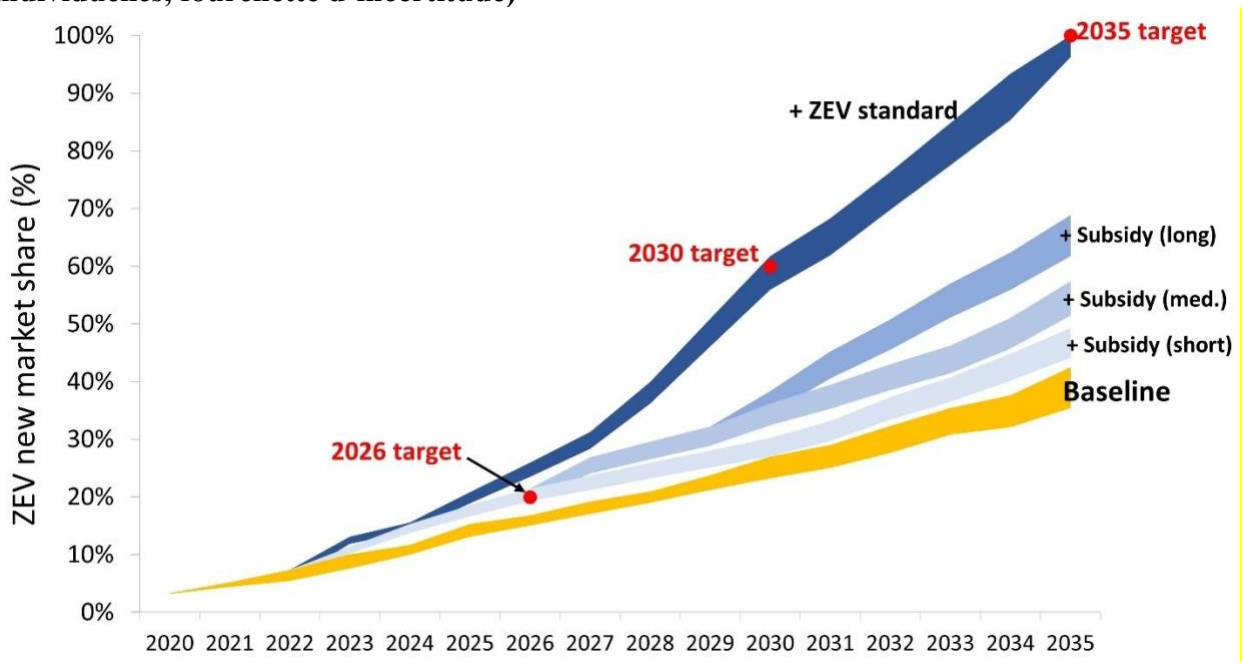
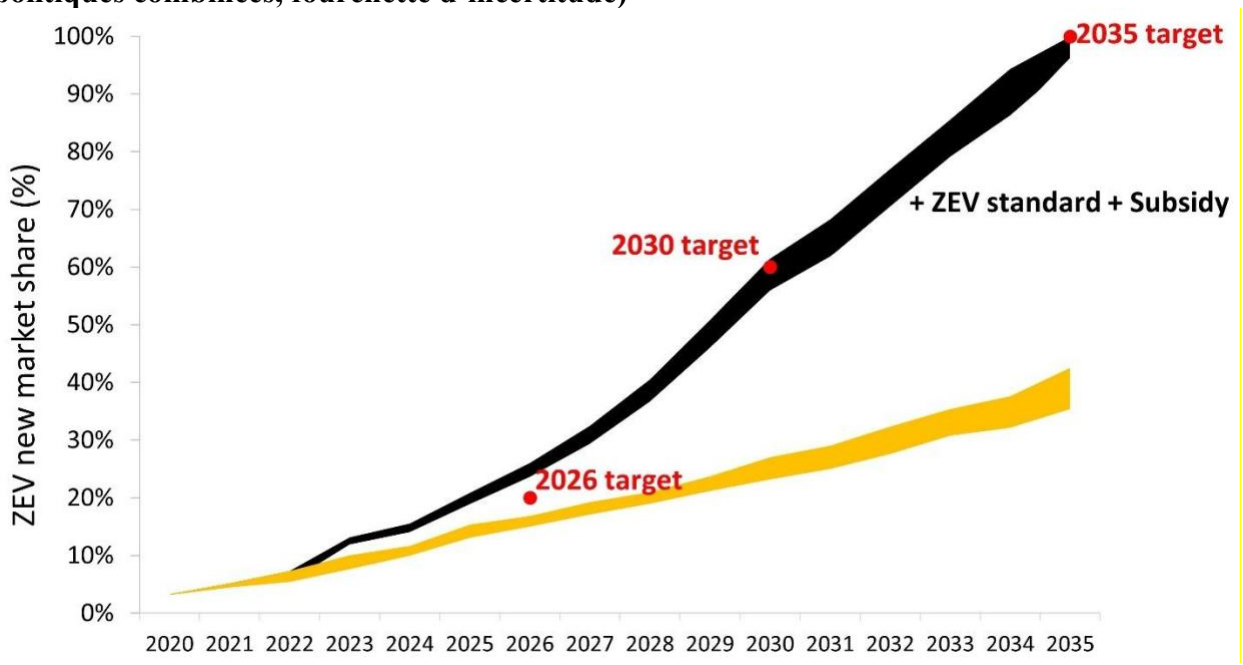


Figure 2b. Part de marché pour les VZE dans les ventes de véhicules neufs (nouvelles politiques combinées, fourchette d'incertitude)



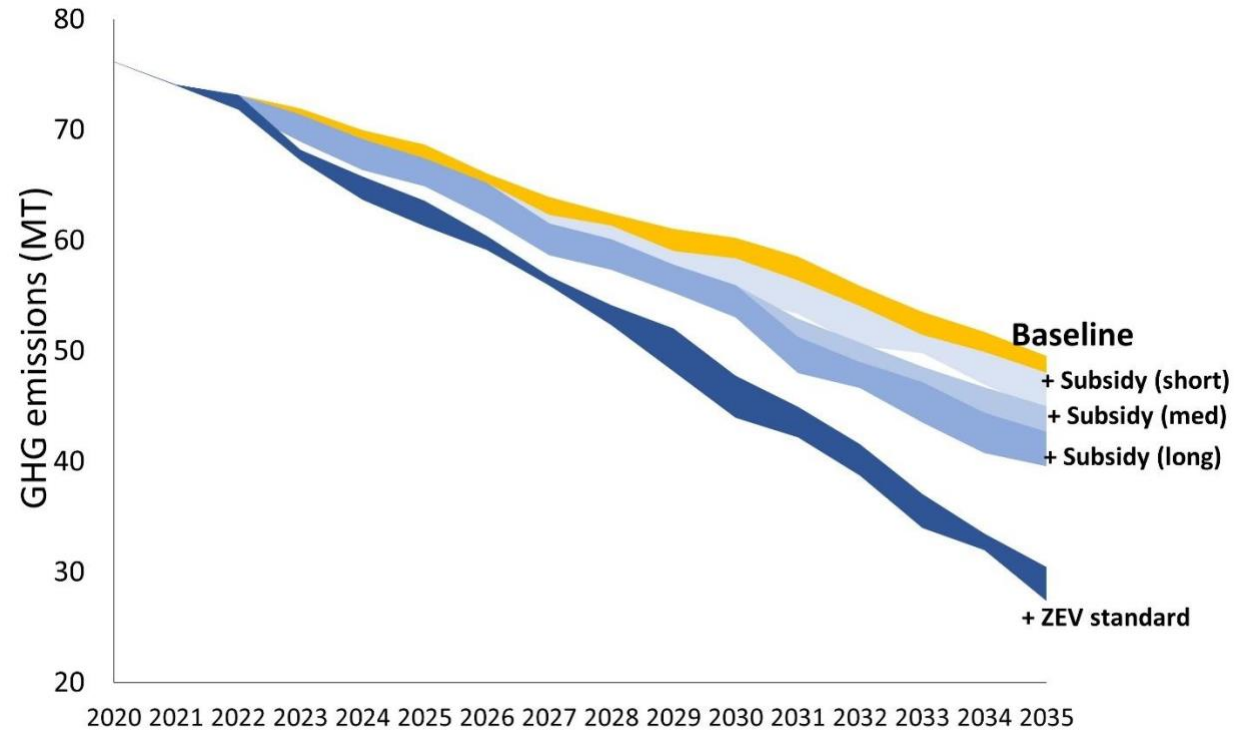
Il convient de souligner que ces scénarios de VZE peuvent présenter des résultats qui sont en deçà des objectifs de ventes de 2030 ou 2035 de plusieurs points de pourcentage. Deux raisons expliquent cette insuffisance : i) les fabricants automobiles accumulent des crédits en raison d'une conformité excessive pendant les années précédentes pour pouvoir se conformer aux exigences récentes (uniquement pour 2030), ou ii) les fabricants automobiles choisissent de payer une pénalité de 20 000 $ par crédit pour les véhicules 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 de cumuler la quantité de crédits nécessaire pour être en conformité avec la norme. 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 section « 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 automobiles évaluent le compromis à faire entre le renoncement à des profits en raison de ventes perdues et de paiement des amendes, ou le choix de payer des amendes pour une petite partie des ventes non conformes aux exigences de la norme.

5.2 Émissions de GES

Les figures 3a et 3b présentent les GES émis par les véhicules légers du Canada dans l'ensemble des scénarios. Ces émissions prennent en compte le stock total de véhicules légers et de camions, et non seulement le nombre de nouveaux véhicules vendus chaque année. Si les politiques climatiques rigoureuses présentement en vigueur sont maintenues, la quantité de GES émis chaque année par les véhicules légers continuera de diminuer au-delà de 2035 (non modélisée ou représentée), car le parc de véhicules sera entièrement composé de VZE. Cette analyse tient aussi compte de la possibilité que les politiques augmentent les ventes globales de véhicules si le prix moyen de ces derniers diminue (par exemple, dans un scénario de subvention à l'achat). Elle inclut aussi la probabilité que les ventes globales de véhicules diminuent avec la hausse des prix moyens des véhicules (par exemple, dans le cadre d'un scénario avec une norme ou des mesures de taxation).

Figure 3a. Émissions de GES des véhicules légers (politiques individuelles, fourchette d'incertitude)

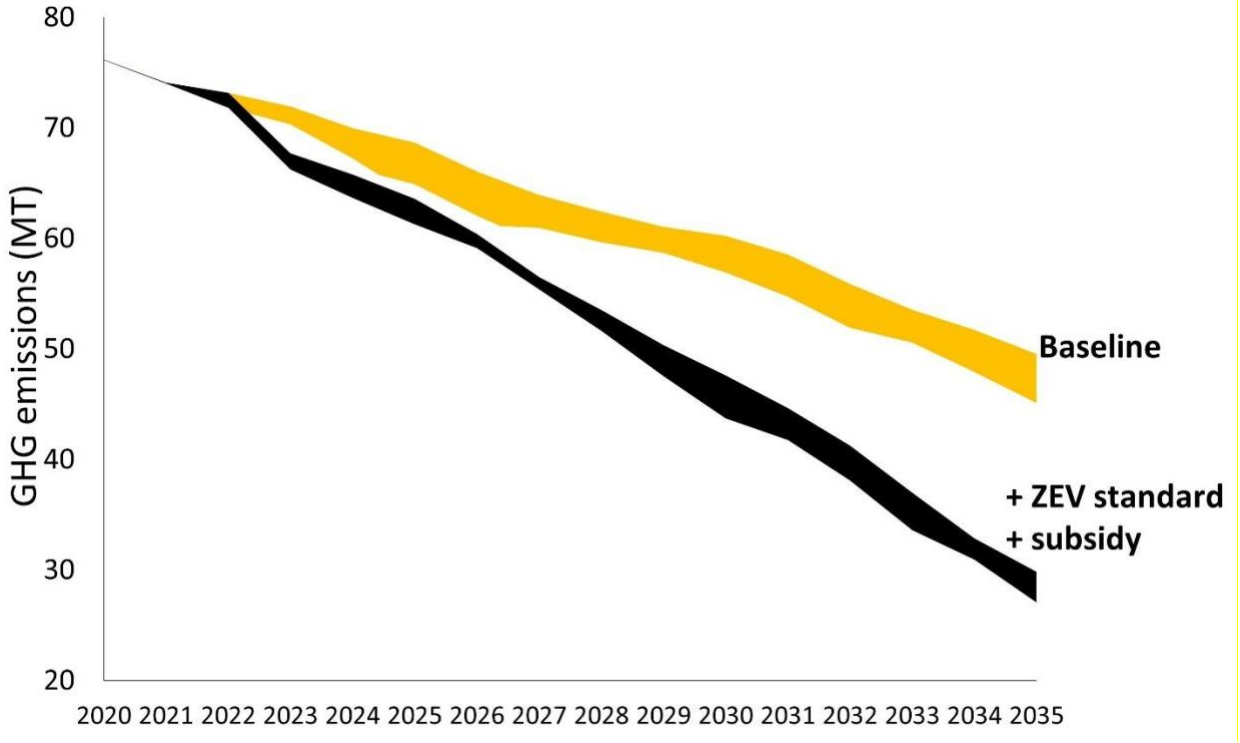


Le scénario de référence permet de constater que les politiques en vigueur réduisent les émissions de GES de 32 à 37 % en 2035 par rapport aux niveaux de 2022. Dans les scénarios basés sur les subventions, les émissions de GES produites par les véhicules légers en 2035 diminuent de 34 à 38 % dans le scénario de subvention à court terme, de 39 à 42 % dans le scénario à moyen terme et de 42 à 45 % dans le scénario à long terme. La modélisation de la

norme VZE démontre une baisse de 58 à 62 % des émissions annuelles de GES des véhicules légers par rapport aux niveaux de 2022 d'ici 2035. Le scénario combinant la norme et les subventions produit un résultat très semblable (figure 3b). Les émissions des GES de 2035 diminuent pour atteindre 59 à 62 %.

Dans les scénarios fondés sur les subventions, les émissions de GES produites par les véhicules légers en 2035 diminuent de 34 à 38 % dans le scénario de subvention à court terme, de 39 à 42 % dans le scénario à moyen terme et de 42 à 45 % dans le scénario à long terme. La norme VZE produit des réductions de GES trois à dix fois plus importantes – entre 123 et 137 Mt.

Figure 3b. Émissions de GES concernant les ventes de véhicules neufs (politiques combinées, fourchette d'incertitude)



5.3 Répercussions sur les constructeurs automobiles : Profits, marges bénéficiaires, prix des véhicules et investissements en R&D

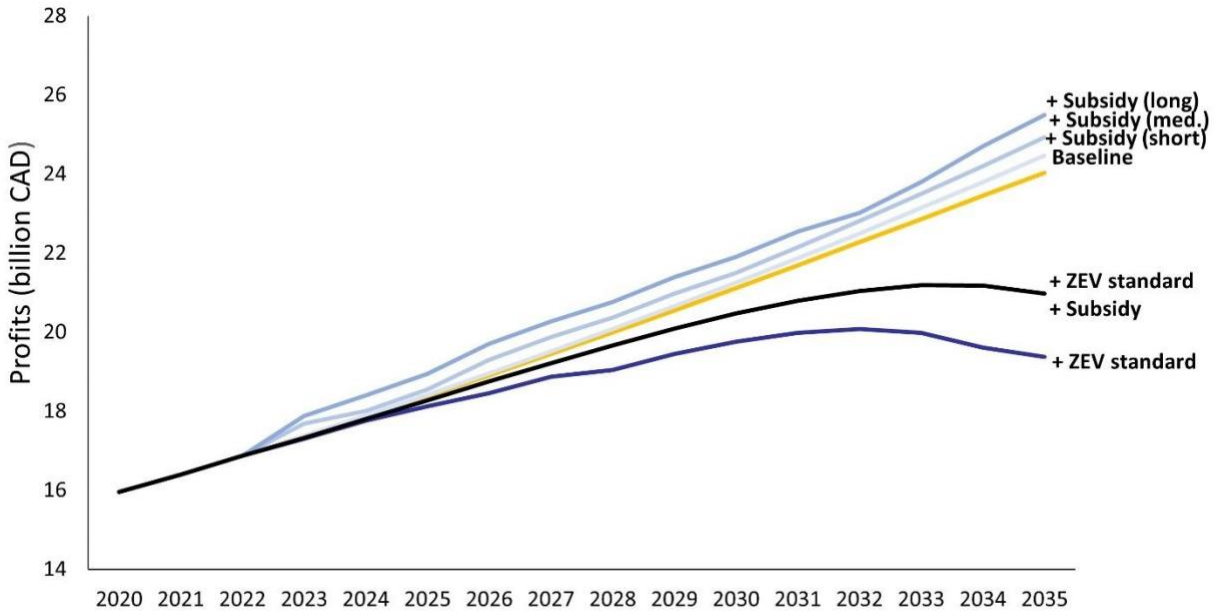
Tous les scénarios démontrent que les profits médians des constructeurs automobiles sont plus élevés en 2035 qu'en 2022 (figure 4). Par rapport aux chiffres du scénario de référence, les gains cumulés (2023-2035) augmentent de 1 à 4 % dans les scénarios axés sur les subventions. Une portion de cette hausse s'explique par la portion des subventions revenant aux constructeurs automobiles (ou « incidence »). Cet aspect est repris dans la section 5.4. Abaisser les prix moyens des véhicules (les VZE tout comme les véhicules à MCI) peut augmenter les ventes totales de véhicules légers.

Quant à la norme VZE, elle diminue les bénéfices cumulés de 7,5 % par rapport au scénario de référence en raison de la modification des pratiques des constructeurs automobiles (tarification, investissement en R&D et autres stratégies). La diminution des ventes de véhicules, la baisse des marges bénéficiaires des VZE et les coûts supplémentaires investis en R&D pendant les premières années constituent aussi des facteurs. La norme VZE entraine néanmoins une augmentation des profits annuels des constructeurs automobiles de 15 % entre 2022 et 2035.

Ce résultat s'explique par l'hypothèse que les ventes de véhicules continueront à croître à long terme.

Le scénario alliant la norme VZE et l'octroi de subventions réduit les profits cumulés d'aussi peu que 4,2 % ; l'impact sur les bénéfices des constructeurs est donc largement moindre que la seule norme VZE.

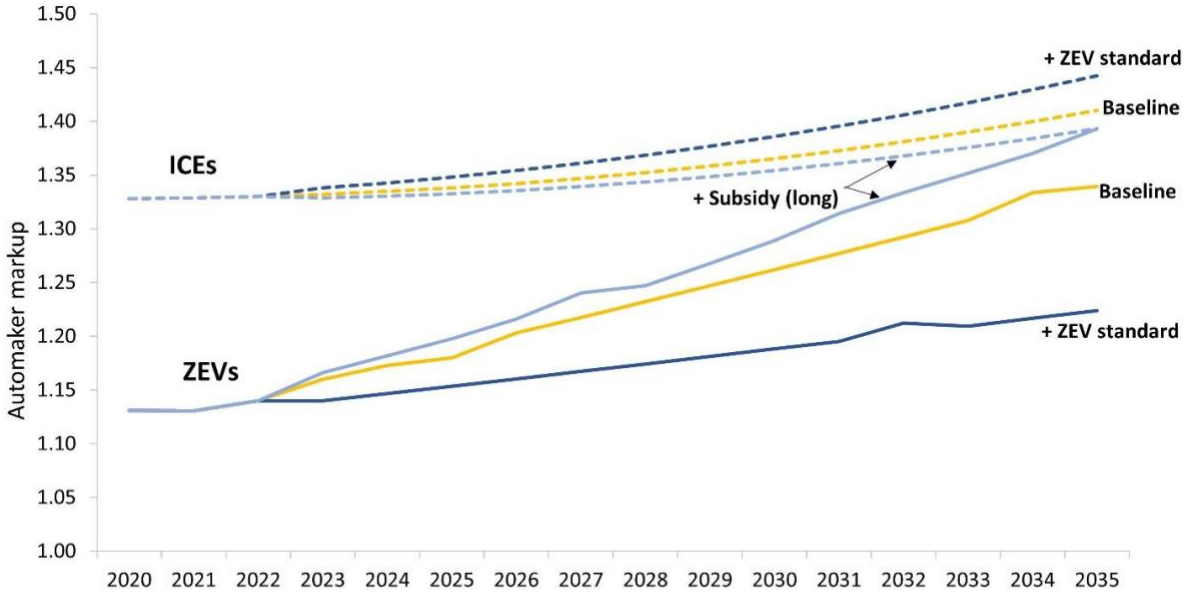
Figure 4. Profits des constructeurs automobiles (simulations médianes)



La « marge bénéficiaire » du véhicule se calcule ainsi : la différence de pourcentage entre le prix de vente du véhicule et ses coûts de fabrication (figure 5). Aucune distinction n'est faite entre la part revenant aux constructeurs automobiles, aux concessionnaires ou à d'autres entreprises. Dans l'ensemble des scénarios, les marges bénéficiaires des VZE augmentent progressivement de 2023 jusqu'en 2035, au fur et à mesure des avancées technologiques. La norme VZE entraine des marges bénéficiaires moyennes d'environ 18 % pour les VZE, tout en augmentant la moyenne de celles des véhicules à MCI de 38 %, comparativement à la majoration moyenne de 25 % des prix dans le scénario de référence entre 2023 et 2035. Cette tendance dénote que les constructeurs automobiles subventionnent leurs véhicules « à prix croisés », de manière à se conformer à la norme VZE. Ces fabricants gonflent donc davantage les prix des véhicules à MCI afin de pouvoir diminuer celui des VZE, augmentant d'autant plus leur part de ventes de VZE.

En revanche, les scénarios axés sur les subventions font en sorte d'augmenter les marges bénéficiaires moyennes des VZE de 27 % au cours de la même période, l'industrie profitant d'une partie des subventions accordées. Simultanément, les prix des véhicules à MCI sont légèrement diminués. Les scénarios fondés sur les subventions ont donc, de toute évidence, l'effet inverse de celui de la norme VZE sur les marges bénéficiaires des véhicules.

Figure 5. Marge bénéficiaire des constructeurs automobiles (simulations médianes)



Les prix de vente moyens des VZE et des véhicules à MCI donnent des résultats similaires à ceux des marges bénéficiaires (figures 6 et 7). Tous les scénarios font en sorte d'abaisser le prix de vente des VZE par rapport au scénario de référence. La norme VZE entraîne une baisse moyenne d'environ 7 200 $ entre 2023 et 2035 (soit une réduction de 22 %). Parallèlement, la norme VZE incite les constructeurs automobiles à augmenter le prix moyen des véhicules à MCI de 6 % par rapport au scénario de référence (de 2023 à 2035), de manière à les aider à respecter les objectifs de vente requis.

Les scénarios axés sur les subventions entrainent par contre une diminution moyenne des prix des VZE d'environ 30 % lorsque ces subventions sont en vigueur. Cependant, les prix redeviennent semblables à ceux du scénario de référence une fois la subvention fédérale supprimée. Les scénarios de subventions provoquent une réduction moyenne des prix des véhicules à MCI de 1 à 8 % (réductions allant de 200 $ à 2 300 $ par véhicule en moyenne), et des réductions plus importantes sont entrainée avec l'octroi de subventions à long terme.

Figure 6. Prix des VZE (simulations médianes)

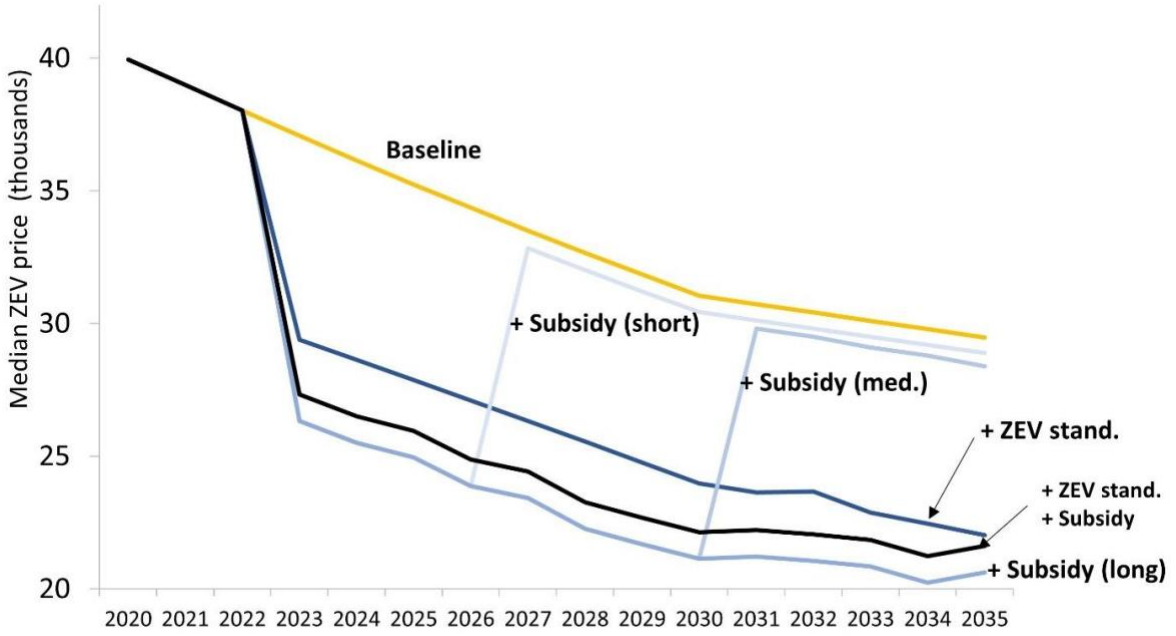
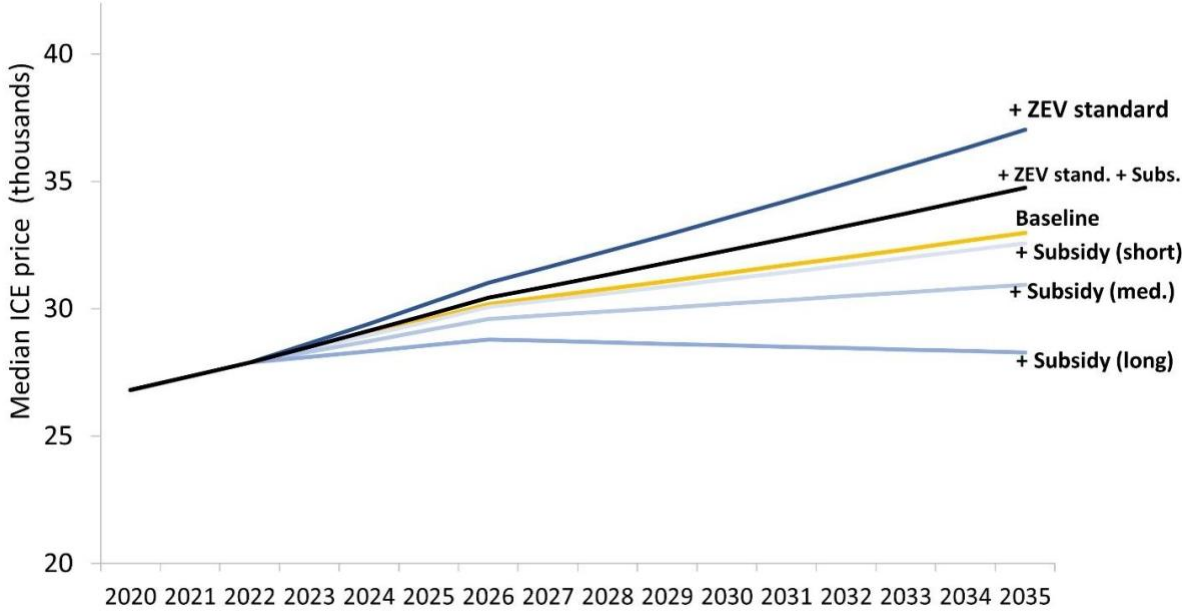
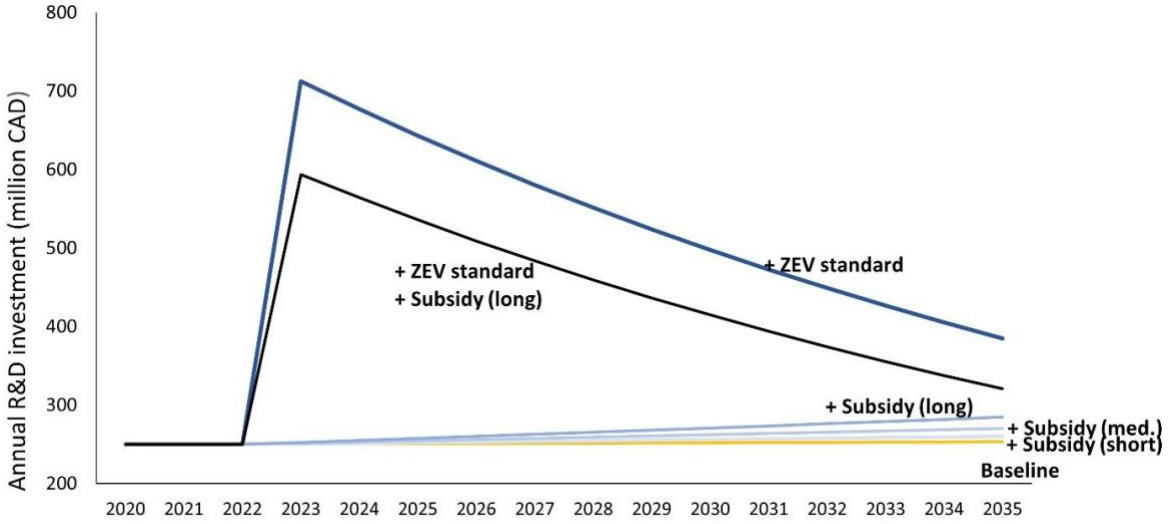


Figure 7. Prix des MCI (simulations médianes)



Il faut prendre en compte un dernier point concernant les profits des consutructeurs automobiles : les investissements dans les activités liées à la R&D. Ces dernières peuvent comprendre les coûts de main-d'œuvre et les capitaux investis dans le but de réduire les coûts de fabrication des VZE au Canada (figure 8). Aucun des trois scénarios axés sur les subventions n'a une forte incidence sur les investissements des fabricants en R&D liés aux VZE. La norme VZE induit cependant une augmentation initiale des dépenses effectuées en R&D d'environ 180 % en 2023 et fait plus que doubler les investissements cumulés en R&D dans les VZE entre 2023 et 2035 par rapport aux données de référence.

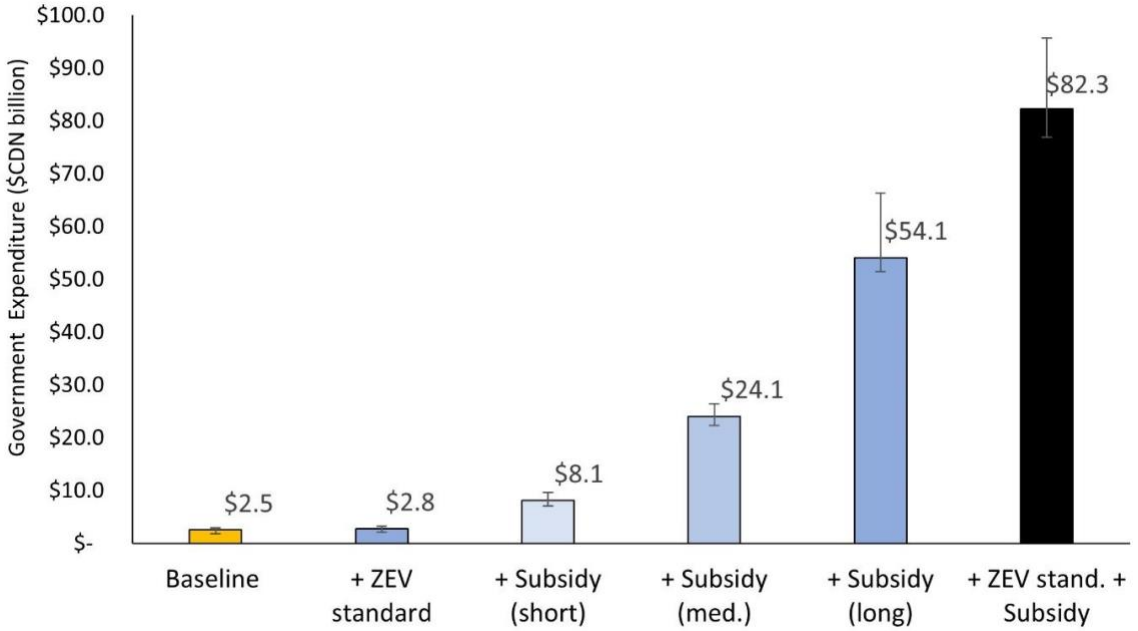
Figure 8. Investissements en recherche et développement (simulations médianes)



5.4 Subventions : Dépenses publiques et part des constructeurs automobiles

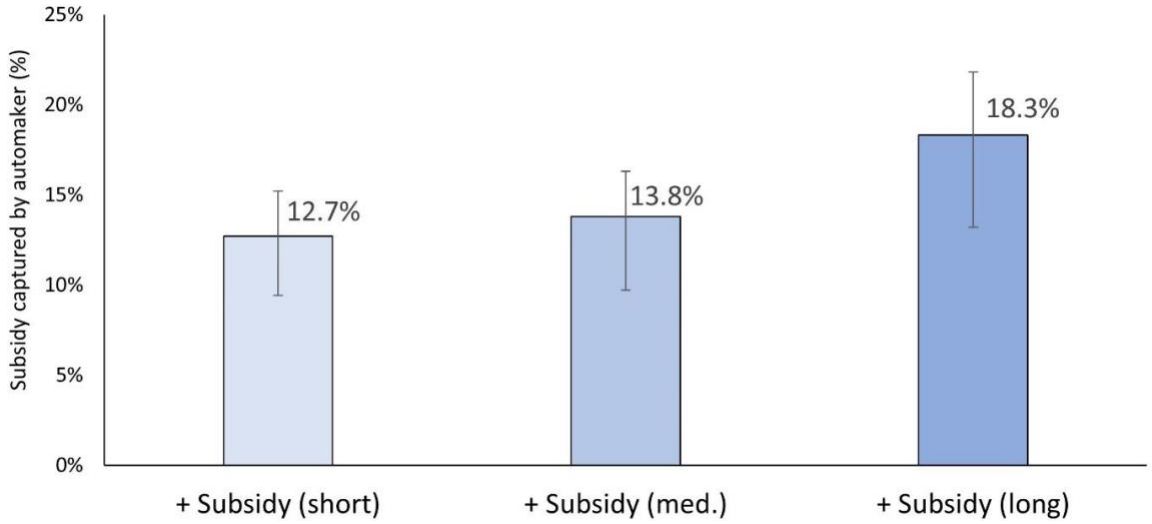
Dans chacun des scénarios, la portion réservée aux subventions équivaut à des milliards de dollars de dépenses publiques au cours de l'horizon temporel modélisé (total pour 2023 à 2035, non actualisé). Les scénarios de référence et ceux incluant une norme VZE comprennent les incitatifs à l'achat actuellement en vigueur à hauteur d'environ 2,5 milliards de dollars en dépenses. Lorsque la somme de la subvention fédérale est triplée, les dépenses publiques augmentent pour atteindre 8 milliards de dollars pour la subvention à court terme, 24 milliards de dollars pour la subvention à moyen terme et 54 milliards de dollars pour la subvention à long terme. Combiner la norme VZE à la politique de subventions triplées jusqu'en 2035 coûte plus de 80 milliards de dollars en dépenses publiques. Ces frais considérables découlent de l'augmentation des ventes de VZE, multipliée par la subvention accordée pour chaque vente de VZE.

Figure 9. Dépenses gouvernementales (en G$, total pour 2023-2025, non actualisées)



Dans les trois scénarios axés sur les subventions, les constructeurs automobiles (et potentiellement d'autres parties prenantes du secteur automobile) accaparent 13 à 18 % de la valeur des subventions à l'achat. Le scénario de subventions à long terme s'accompagne d'une portion plus importante (figure 10). Cette fourchette de valeurs correspond aux estimations et aux calculs figurant dans les études publiées[13], mais elle est un peu plus élevée que celles observées dans certaines autres études.[14,15]

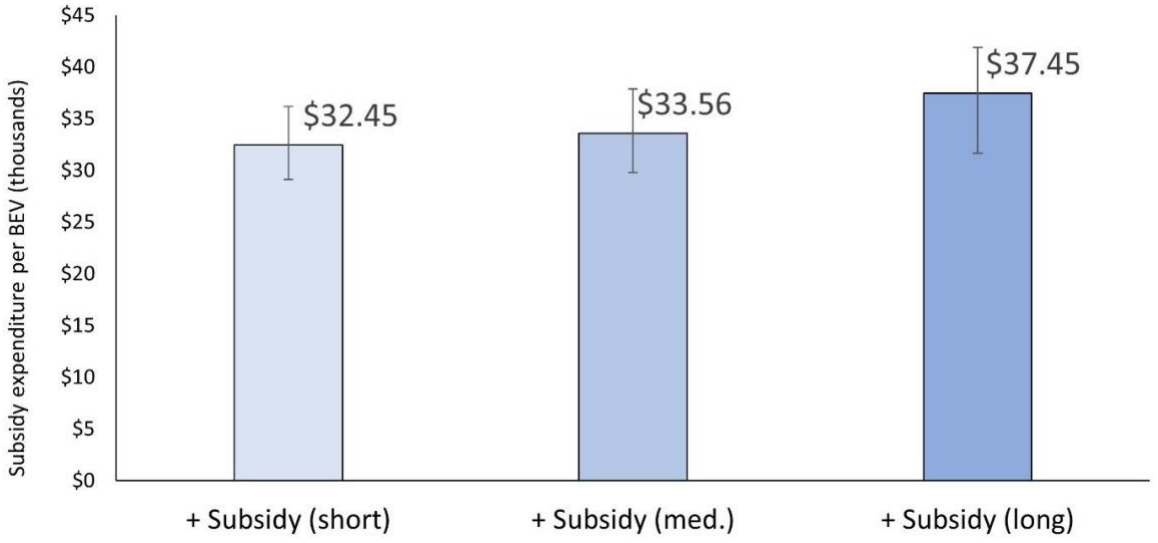
Figure 10. Incidence des subventions, part des constructeurs automobiles (en milliards de dollars [G$], total pour 2023-2025, non actualisée)



Cette analyse tient par ailleurs compte du lien existant entre les dépenses publiques requises et l'efficacité des scénarios de subventions en termes aux ventes de VZE et de réduction des émissions de GES. Ce calcul ne constitue pas une analyse économique « coût-efficacité » exhaustive, mais il reflète certains des compromis à faire lorsqu'on opte pour les programmes reposant sur les subventions. Les dépenses publiques par VZE supplémentaire vendu

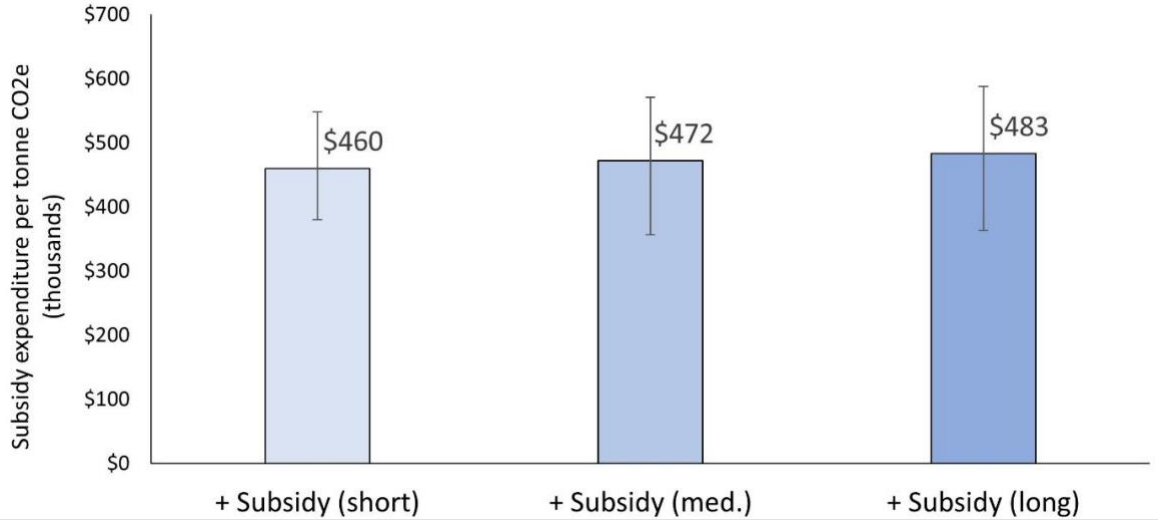
représentent le premier de ces compromis. Ces frais s'élèvent à plus de 32 000 $ par véhicule pour chacun des trois scénarios basés sur les subventions (figure 11). Des chiffres similaires ont été trouvés dans d'autres études, principalement en raison du phénomène de resquillage, soit que des consommateur(trice)s qui se seraient de toute façon procuré un VZE ont tout de même droit à la subvention.[10,12]

Figure 11. Dépenses en subvention par vente supplémentaire de VEB (en milliers de dollars)



Voici les dépenses publiques par tonne supplémentaire d'équivalent CO_2 évité, qui représente plus de 450 $ la tonne pour les scénarios médians pendant les trois durées possibles de la mise en place de la stratégie de subventions (figure 12). Encore une fois, ces valeurs sont conformes à la littérature existante.[12,41]

Figure 12. Dépenses de subvention par tonne évitée ($/tonne éq. CO_2)



6. Principales conclusions

Le choix de la politique climatique ou de la combinaison de politiques climatiques idéale exige plusieurs compromis. Voici certaines perspectives issues d'un sous-ensemble de critères d'évaluation des politiques, à savoir les répercussions sur les aspects suivants : ventes de VZE, réduction des émissions de GES, profits des constructeurs automobiles, prix de VZE, investissements en R&D, dépenses publiques et incertitude des estimations futures. Il est clair que les politiques climatiques actuelles au Canada, celles du scénario de référence, ne sont pas suffisamment strictes pour atteindre les cibles fédérales en matière de ventes de VZE pour les véhicules légers.

Parmi les deux voies stratégiques que nous évaluons, celle de la norme VZE comporte plusieurs avantages par rapport à une approche s'appuyant sur les subventions à grande échelle de manière soutenue. Plus particulièrement, la norme VZE, relativement aux scénarios de subventions, peut :

- Atteindre les objectifs de vente de VZE (ou se rapprocher de l'atteinte de ceux-ci) pour 2026, 2030 et 2035, alors que même un programme de subventions à long terme est loin d'atteindre l'objectif fixé;
- Diminuer de manière plus importante les émissions de GES d'ici 2035;
- Entraîner une réduction d'environ un cinquième du prix de vente moyen des VZE;
- Inciter les constructeurs automobiles à doubler leurs investissements en R&D liés aux VZE;
- Maintenir la possibilité pour les constructeurs automobiles d'engranger des bénéfices globalement à la hausse entre 2022 et 2035;
- Réduire de façon importante les dépenses publiques en lien avec les subventions.

En revanche, les scénarios de subventions font gagner davantage aux constructeurs automobiles, y compris en décuplant les profits des constructeurs automobiles grâce à la portion des subventions qu'ils s'approprient (13 à 18 %). Ce taux de ponction signifie toutefois aussi que les consommateur(trice)s ne bénéficient pas entièrement de la valeur de la subvention. De plus, lorsque les subventions à valeur élevée sont en vigueur, on observe une baisse plus importante du prix de vente moyen des VZE — environ 30 % — (comparativement à une baisse de 20 % pour la norme VZE).

Enfin, il pourrait y avoir un avantage politique à combiner la norme VZE et des subventions plus importantes pendant un certain temps. La présente modélisation révèle que cette combinaison de politiques peut produire des effets presque identiques à ceux de la seule norme VZE sur les réductions d'émissions de GES, les ventes de VZE et les investissements en R&D. La combinaison peut d'autre part minimiser les pertes de profits des fabricants automobiles par rapport à la norme VZE seule. Toutefois, l'action conjuguée de ces politiques augmentera les dépenses publiques nécessaires, celles-ci pouvant atteindre 80 milliards de dollars si cette combinaison est maintenue jusqu'en 2035.

Naturellement, ces résultats sont propres aux hypothèses de ce modèle et aux scénarios particuliers qui sont à l'étude. Cependant, tous les résultats présentés ici demeurent cohérents pour l'ensemble des paramètres optimistes et pessimistes que nous utilisons dans nos analyses d'incertitude. Nous croyons donc que les résultats généraux que nous mettons en évidence sont assez solides pour les principales hypothèses.

Les recherches ultérieures pourraient aussi analyser les coûts financiers globaux de chaque scénario (y compris le bien-être collectif), ainsi que l'acceptabilité politique et les impacts d'équité des différentes politiques (qui n'ont pas fait l'objet d'études dans le présent cas). Il serait aussi possible d'explorer plus en détail d'autres mesures politiques (et combinaisons de mesures politiques), y compris d'autres formes de norme VZE, ainsi qu'une norme stricte sur les émissions des véhicules ou une approche basée sur la redevance-remise. Le modèle de simulation *AUM* pourrait également être élargi afin de mieux examiner certains aspects de l'industrie automobile, comme le segment des véhicules de luxe, l'exploration plus fine des répercussions sur différentes classes de véhicules (p. ex., petite voiture, grande voiture, VUS et camionnette), et la variété des répercussions sur différents groupes de consommateur(trice)s et sur divers fabricants automobiles.

Références

1 Axsen, J., Plötz, P. & Wolinetz, M. Crafting strong, integrated policy mixes for deep CO_2 mitigation in road transport. *Nature Climate Change* 10, 809-818 (2020).

2 Environnement et Changement climatique Canada. Rapport d'inventaire national 1990-2020 : Greenhouse Gas Sources and Sinks in Canada, Canada's submission to the United Nations Framework Convention on Climate Change (2022).

3 Environnement et Changement climatique Canada. Rapport d'inventaire national 1990-2019 : Greenhouse Gas Sources and Sinks in Canada, Canada's submission to the United Nations Framework Convention on Climate Change (2021).

4 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 (2018). https://doi.org:https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.09.012

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

6 Axsen, J., Hardman, S. & Jenn, A. What Do We Know about Zero-Emission Vehicle Mandates? *Environ Sci Technol* (2022). https://doi.org:10.1021/acs.est.1c08581

7 Jenn, A., Lee, J. H., Hardman, S. & Tal, G. An Examination of the Impact That Electric Vehicle Incentives Have on Consumer Purchase Decisions Over Time. (ITS Davis, Davis, California, 2019).

8 Hardman, S., Chandan, A., Tal, G. & Turrentine, T. The effectiveness of financial purchase incentives for battery electric vehicles – A review of the evidence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **80**, 1100-1111 (2017). https://doi.org:https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.255

9 Hardman, S. *et al.* A review of consumer preferences of and interactions with electric vehicle charging infrastructure. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **62**, 508-523 (2018). https://doi.org:https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.04.002

10 DeShazo, J. R., Sheldon, T. L. & Carson, R. T. Designing policy incentives for cleaner technologies: Lessons from California's plug-in electric vehicle rebate program. *Journal of Environmental Economics and Management* **84**, 18-43 (2017). https://doi.org:https://doi.org/10.1016/j.jeem.2017.01.002

11 Münzel, C., Plötz, P., Sprei, F. & Gnann, T. How large is the effect of financial incentives on electric vehicle sales? – A global review and European analysis. *Energy Economics*, 104493 (2019). https://doi.org:https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104493

12 Sheldon, T. L. & Dua, R. Measuring the cost-effectiveness of electric vehicle subsidies. *Energy Economics* **84**, 104545 (2019). https://doi.org:https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104545

13 Gulati, S., McAusland, C. & Sallee, J. M. Tax incidence with endogenous quality and costly bargaining: Theory and evidence from hybrid vehicle subsidies. *Journal of Public Economics* **155**, 93-107 (2017). https://doi.org:https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2017.09.003

14 Sallee, J. M. The Surprising Incidence of Tax Credits for the Toyota Prius. *American Economic Journal: Economic Policy* **3**, 189-219 (2011).

15 Muehlleger, E. & Rapson, D. Subsidizing mass adoption of electric vehicles: Quasi-experimental evidence from California (No. UC-ITS-2018-33). (National Bureau of Economic Research., 2018).

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

17 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 (2016). https://doi.org:https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.12.005
18 Greene, D. L. TAFV alternative fuels and vehicles choice model documentation. (Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory, Center for Transportation Analysis., 2001).
19 Axsen, J., Bailey, J. & Castro, M. A. Preference and lifestyle heterogeneity among potential plug-in electric vehicle buyers. *Energy Economics* **50**, 190-201 (2015). https://doi.org:http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2015.05.003
20 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 (2019). https://doi.org:https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.10.010
21 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 (2017). https://doi.org:https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.01.017
22 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 (2013). https://doi.org:https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.08.001
23 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 (2018). https://doi.org:https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.12.006
24 National Energy Board. (2019).
25 US EIA. Annual Energy Outlook. (2020).
26 IEA. World Energy Outlook. (2020).
27 Kneoma. Crude oil price forecast (2021).
28 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).
29 IEA. Global EV Outlook 2022. (International Energy Agency, Paris, France, 2022).
30 Burton, M. in *Bloomberg* (2022).
31 Fouquet, R. Trends in income and price elasticities of transport demand (1850–2010). *Energy Policy* **50**, 62-71 (2012). https://doi.org:http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.001
32 Holmgren, J. Meta-analysis of public transport demand. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **41**, 1021-1035 (2007). https://doi.org:https://doi.org/10.1016/j.tra.2007.06.003
33 Small, K. A. & Van Dender, K. Fuel Efficiency and Motor Vehicle Travel: The Declining Rebound Effect. *The Energy Journal* **28**, 25-51 (2007).
34 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 (2012). https://doi.org:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.05.038
35 Barreto, L. & Kypreos, S. Endogenizing R&D and market experience in the "bottom-up" energy-systems ERIS model. *Technovation* **24**, 615-629 (2004).
36 Jagannathan, R., Matsa, D. A., Meier, I. & Tarhan, V. Why do firms use high discount rates? *Journal of Financial Economics* **120**, 445-463 (2016). https://doi.org:https://doi.org/10.1016/j.jfineco.2016.01.012
37 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).

38 Plötz, P., Moll, C., Bieker, G. & Mock, P. From lab-to-road: real-world fuel consumption and CO2 emissions of plug-in hybrid electric vehicles. *Environmental Research Letters* **16**, 054078 (2021). https://doi.org:10.1088/1748-9326/abef8c
39 Axsen, J. & Bhardwaj, C. Policy Pathways to 100% Zero-Emission Vehicles by 2035 in Canada: Analysis and Research Report. (Prepared for Equiterre and the David Suzuki foundation, 2022).
40 IEA. Net Zero by 2050. (IEA, Paris, France, 2021).
41 Fournel, J.-F. Electric Vehicle Subsidies: Cost-Effectiveness and Emission Reductions. (McGill University, Montreal, Canada, 2022).