

Un Canada carboneutre d'ici 2050

Évaluation des trajectoires vers la carboneutralité
préparées pour l'Institut canadien pour des choix
climatiques



PRÉPARÉ POUR :

Institut canadien pour des choix climatiques
20 janvier 2021

PRÉSENTÉ PAR :

Navius Research Inc.
C. P. 48300, Bentall Centre
Vancouver (Colombie-Britannique) V7X 1A1

Brianne@NaviusResearch.com

Qui sommes-nous?

Navius Research Inc. (« Navius ») est une société de conseil privée de Vancouver se spécialisant dans l'analyse de politiques environnementales publiques et privées, plus précisément de politiques visant l'énergie ou les émissions de gaz à effet de serre. Œuvrant dans le domaine de l'énergie et des changements climatiques depuis 2004, elle est considérée comme l'un des chefs de file du Canada en modélisation des répercussions environnementales et économiques des initiatives énergétiques et climatiques. Elle doit la justesse et la pertinence de ses analyses à plusieurs facteurs :

- Une compréhension profonde des enjeux énergétiques et environnementaux du Canada et du monde.
- Des analyses principalement basées sur des modèles uniques et exclusifs du système énergie-économie.
- Un solide réseau d'experts de domaines connexes avec qui elle collabore pour produire des analyses climatiques et énergétiques détaillées et intégrées.
- La rigueur et l'impartialité de ses travaux, qui lui ont valu une réputation nationale et internationale éprouvée auprès de clients de tous les secteurs : industrie, main-d'œuvre, organisations sans but lucratif et administrations publiques.

Résumé

En novembre 2020, le gouvernement du Canada a déposé le projet de loi C-12, fixant un objectif de zéro émission nette de gaz à effet de serre (GES) d'ici 2050. À la demande de l'Institut canadien pour des choix climatiques, Navius a évalué les options qui permettraient au pays d'atteindre sa cible pour le milieu du siècle. Cette étude explore les avantages et les désavantages des trajectoires potentielles vers la carboneutralité, quantifie l'incertitude associée à chacune et examine les priorités politiques à appliquer.

L'analyse emploie le modèle gTech de Navius – un modèle énergie-économie unique qui combine une représentation réaliste de l'adoption des technologies, un portrait complet de l'économie globale et une simulation détaillée de l'approvisionnement en énergie – pour projeter et comparer une multitude de scénarios menant à la carboneutralité du Canada.

Sélection des trajectoires du Canada vers la carboneutralité

Pour les besoins de cette analyse, nous avons simulé 62 trajectoires permettant de bâtir d'ici 2050 une économie carboneutre, c'est-à-dire une économie produisant zéro émission nette de GES, toutes régions et tous secteurs confondus. Les scénarios ont été élaborés indépendamment des politiques; la seule constante était l'exigence d'atteindre la carboneutralité d'ici la moitié du siècle. Ainsi, ils présentent tous les mêmes réductions des émissions, mais proposent des mesures d'atténuation différentes pour y parvenir. Nous avons utilisé une analyse de décomposition pour comprendre les facteurs derrière ces réductions. Chaque secteur disposant de multiples options pour **diminuer** ses émissions, le modèle a été paramétré selon les habitudes des consommateurs, les technologies disponibles et la rentabilité à long terme.

Pour compenser l'imprévisibilité des tendances technologiques et de l'évolution du contexte mondial, nous avons varié d'un scénario à l'autre les hypothèses concernant quatre grands facteurs d'incertitude :

- 1. Disponibilité et coût des technologies sobres en carbone**, y compris l'évolution des prix des véhicules électriques à batterie, des véhicules à pile à combustible hydrogène, des biocarburants de deuxième génération, etc.
- 2. Disponibilité des technologies à émissions négatives**, y compris la captation atmosphérique directe (CAD) et la captation et le stockage de carbone (CSC).

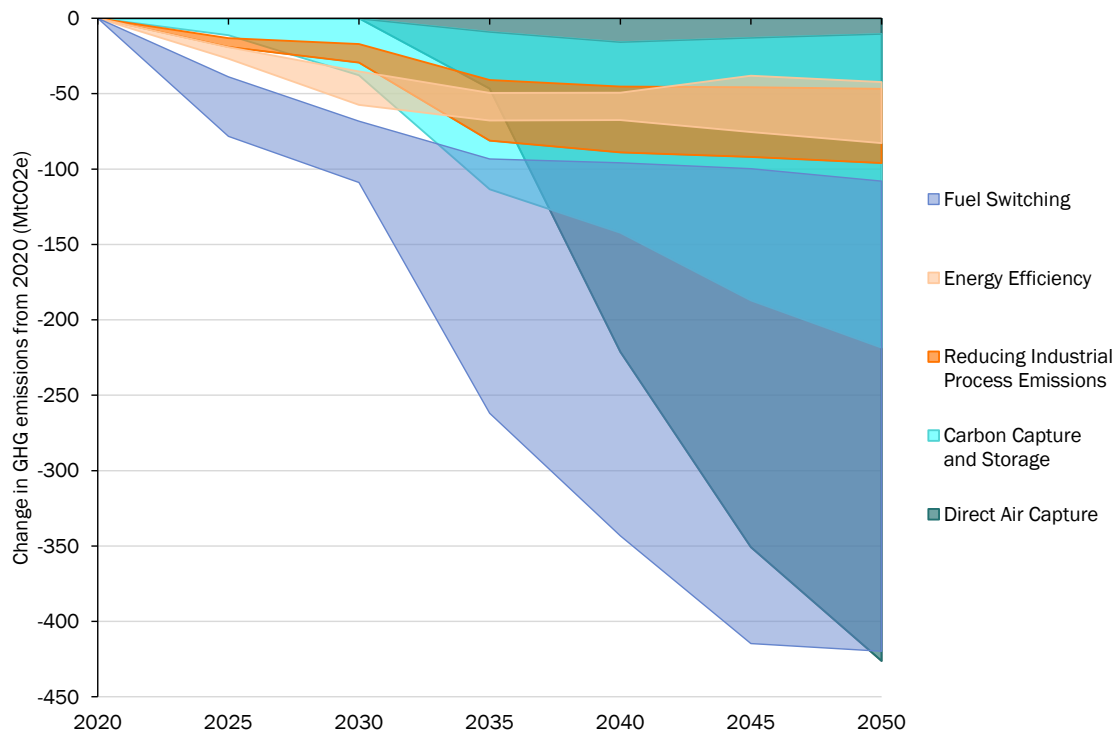
3. **Politiques étrangères et concurrence**, y compris les politiques climatiques des autres grands pays et les mesures pour assurer la compétitivité des secteurs canadiens hautement émetteurs présents sur les marchés internationaux.

4. **Prix des marchandises**, y compris l'évolution du prix du pétrole.

Facteurs de réduction des émissions au Canada

L'analyse a isolé cinq grands facteurs de diminution des émissions au Canada. La figure A illustre la contribution de chacun à l'atteinte de la carboneutralité et présente les fourchettes de réduction potentielle par rapport aux niveaux d'émissions de 2020. L'importance de certains facteurs, comme la CAD, la CSC et le remplacement des combustibles, varie énormément d'un scénario à l'autre, tandis qu'elle reste plus stable pour d'autres, comme l'efficacité énergétique et la décarbonisation industrielle.

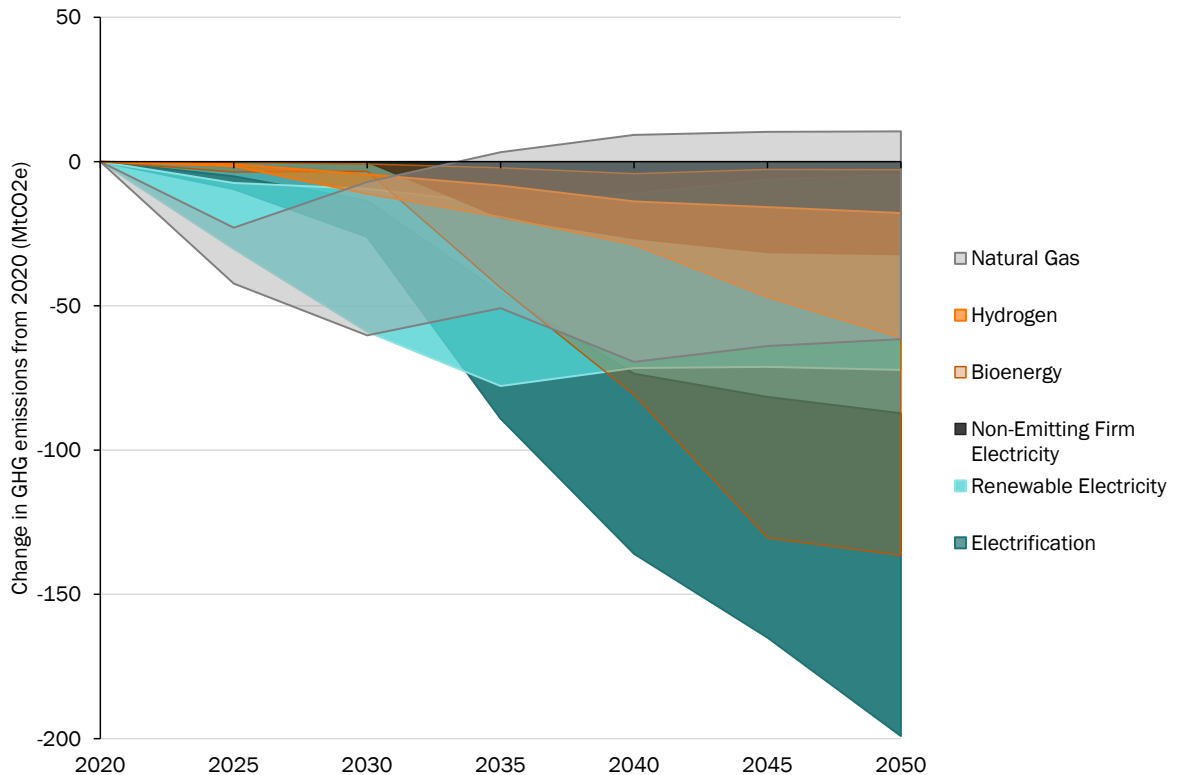
Figure A : Facteurs de réduction des émissions pour un Canada carboneutre



On remarque notamment que, plus les technologies à émissions négatives (CAD, CSC) sont utilisées, plus le remplacement des combustibles par des sources d'énergie propre est relégué au second plan, et vice versa. Dans les scénarios où la CAD et la CSC sont disponibles, elles permettent des progrès importants, pouvant respectivement neutraliser 426 Mt éq. CO₂ et 218 Mt éq. CO₂ d'ici 2050. Lorsque ces options ne sont pas viables, le remplacement des combustibles prend la relève,

pouvant faire diminuer les émissions de 420 Mt éq. CO₂. La figure B présente les réductions potentielles associées aux différents combustibles de remplacement. L'électrification se démarque comme la solution dominante, suivie de la bioénergie (y compris le gaz naturel renouvelable) et de l'hydrogène.

Figure B : Facteurs de réduction par le remplacement des combustibles pour un Canada carboneutre

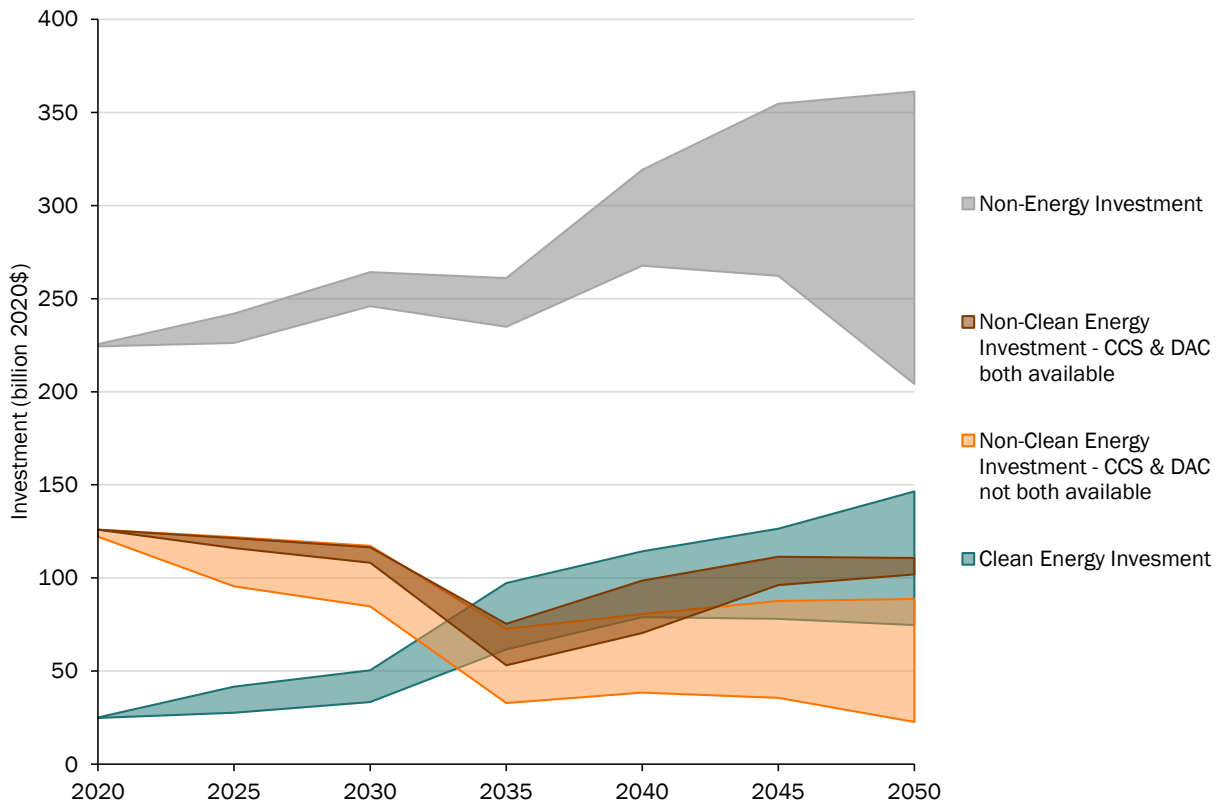


Investir dans une économie propre

Pour que les facteurs de réduction des émissions puissent se développer, le Canada devra cesser d'investir dans les énergies polluantes, comme les combustibles fossiles, pour se concentrer sur les technologies propres, comme l'énergie renouvelable, la fabrication de biocarburants et les véhicules électriques (figure C). En 2020, les investissements totalisaient 126 milliards de dollars pour les énergies polluantes et 25 milliards pour les énergies propres. Dans une économie carboneutre (2050), ils devront plutôt se chiffrer respectivement entre 23 et 111 milliards et 75 et 146,5 milliards, selon la trajectoire choisie. Dans les scénarios où les technologies de CAD et de CSC sont utilisées, elles font l'objet d'importants investissements visant à compenser les émissions du pays, aux dépens d'autres méthodes de décarbonisation comme la production d'électricité et de biocarburants. Dans les scénarios où elles ne sont pas viables, on observe plutôt des investissements considérables dans les

énergies propres. Les véhicules électriques maintiennent une grande importance dans tous les scénarios.

Figure C : Investissement annuel total, toutes trajectoires confondues



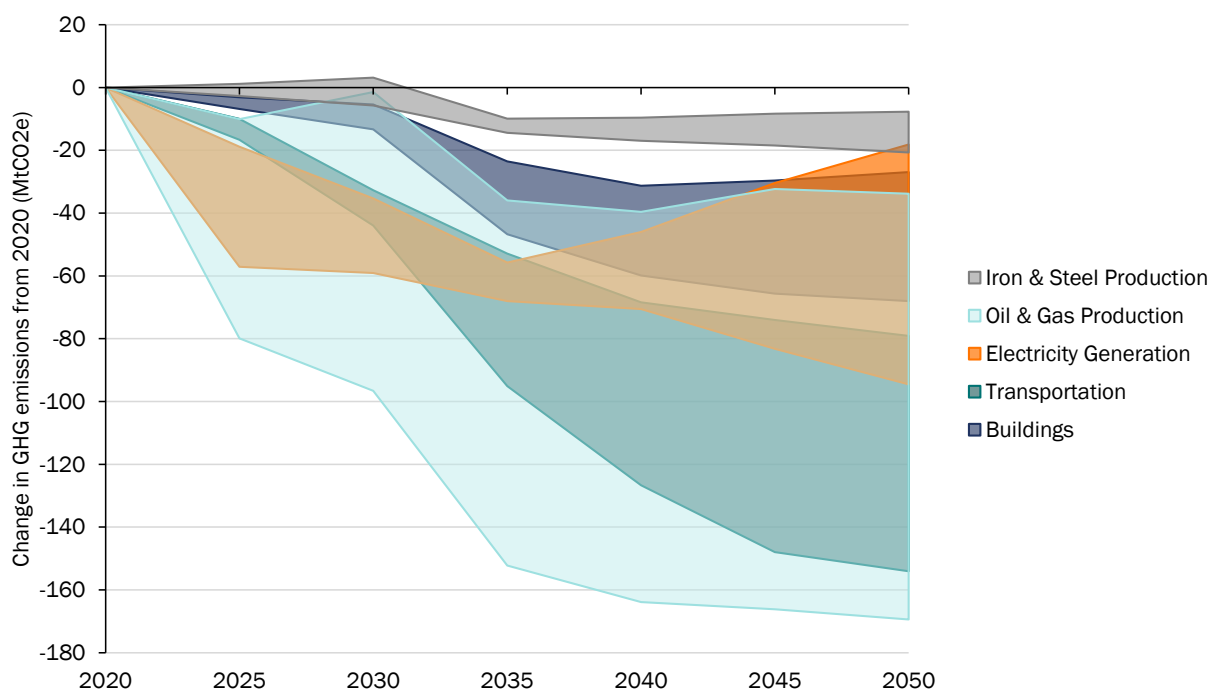
Facteurs sectoriels de réduction des émissions

Nous avons aussi analysé les options d'atténuation propres à chaque secteur. La figure D illustre l'évolution des émissions sectorielles par rapport aux niveaux de 2020, représentant les différentes trajectoires potentielles par des fourchettes de valeurs.

L'électrification sera l'un des principaux facteurs de réduction pour les bâtiments commerciaux et résidentiels, suivie de l'efficacité énergétique et des biocarburants. Elle sera aussi au premier plan de la décarbonisation de l'automobile, mais s'inclinera devant la bioénergie et l'hydrogène pour les véhicules lourds et mi-lourds. Tous les scénarios carboneutres requièrent une augmentation marquée de la production d'électricité, suivant la demande croissante de technologies propres. La baisse de la production d'énergie thermique au profit des énergies renouvelables, combinées à la CSC lorsque possible, est aussi un facteur de réduction récurrent dans le secteur.

Ce rapport examine trois secteurs industriels : le pétrole, le gaz naturel et la sidérurgie. L'avenir des deux premiers est incertain au Canada, car si les autres grands pays adoptent des politiques climatiques semblables aux nôtres (réduisant leur demande de pétrole et de gaz) et que la CAD n'est pas possible, la production devra ralentir pour assurer une réduction suffisante des émissions. Lorsque viable, la CSC joue aussi un rôle essentiel dans le secteur du pétrole, tout comme l'électrification dans celui du gaz naturel. Le secteur sidérurgique peut quant à lui se décarboniser entièrement dans tous les scénarios, en adoptant des modes de production propre, comme la réduction directe du fer et le recyclage de l'acier.

Figure D : Évolution des émissions sectorielles de GES d'aujourd'hui à la carboneutralité



Grands constats

L'analyse permet de tirer quatre grands constats :

- 1. Le Canada a plusieurs options pour atteindre la carboneutralité d'ici le milieu du siècle.** De fait, les technologies et options de dépollution industrielle actuellement sur le marché suffisent déjà à réaliser cet objectif. Le système énergétique adopté par le pays dépendra toutefois grandement du coût et de la disponibilité des technologies à émissions négatives ainsi que de la demande internationale de pétrole et de gaz.
- 2. Le Canada aura besoin d'un filet de sécurité pour atteindre la carboneutralité.** Les options d'atténuation sont insuffisantes pour éliminer complètement les émissions de certains secteurs. Il faudra donc employer des technologies à émissions négatives, comme la CAD, la CSC ou le piégeage du carbone dans les sols et les forêts. Ce sont l'accessibilité, l'applicabilité à grande échelle et la rentabilité qui détermineront laquelle de ces technologies sera au premier plan de la décarbonisation de l'économie.
- 3. L'avenir du secteur pétrolier et gazier est incertain.** Le maintien de leur production au pays ne se fera pas sans technologies à émissions négatives (CAD ou CSC). Si l'adoption de politiques climatiques dans d'autres grands pays fait décroître la demande mondiale, la production nationale risque de diminuer considérablement. Cependant, dans tous les scénarios carboneutres, les réductions de dioxyde de carbone deviennent une précieuse marchandise. C'est là une occasion en or pour l'Ouest du pays, dont le potentiel de stockage géologique peut être exploité grâce aux technologies de CAD ou de CSC.
- 4. La trajectoire empruntée par le Canada repose sur des décisions que nous prenons maintenant.** Certaines mesures doivent obligatoirement être prises dans tous les scénarios analysés, notamment la hausse substantielle de la capacité de production d'électricité, de la fabrication de biocarburants, des investissements dans les technologies propres et de la capacité de piégeage de GES, de même que l'adoption d'un mode de production d'acier complètement décarbonisé.

Table des matières

Résumé	iv
1. Introduction.....	1
2. Méthode analytique.....	2
2.1. Présentation du modèle gTech.....	2
2.1.1. Aperçu du modèle gTech	2
2.1.2. Étalonnage du modèle.....	7
2.1.3. Limite des projections.....	8
2.1.4. Méthode de décomposition.....	9
2.2. Scénarios et hypothèses	10
2.2.1. Définition de la carboneutralité	10
2.2.2. Élaboration des scénarios	12
2.2.3. Autres hypothèses importantes.....	23
3. Portrait d'un Canada carboneutre.....	27
3.1 Facteurs de réduction des émissions au Canada	27
3.1.1 Principales mesures de réduction des émissions	27
3.1.2 Adoption de technologies propres	33
3.1.3 Investissements dans les technologies propres.....	34
3.2 Facteurs de réduction des émissions dans des secteurs névralgiques.....	37
3.2.1 Immobilier.....	37
3.2.2 Transport.....	40
3.2.3 Électricité	46
3.2.4 Secteur industriel.....	49
4. Grands constats	58
Annexe A : Secteurs, combustibles et utilisations finales couverts	60
Annexe B : Décomposition du calcul des émissions.....	66
Annexe C : Possibilités de réduction par secteur.....	69
Annexe D : Liste des scénarios de carboneutralité	76

1. Introduction

En novembre 2020, le gouvernement du Canada a déposé le projet de loi C-12, fixant un objectif de zéro émission nette de gaz à effet de serre (GES) d'ici 2050¹. Cette initiative correspond aux engagements pris conformément à l'Accord de Paris² ainsi qu'aux conclusions du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), selon lesquelles l'économie mondiale devra être carboneutre d'ici le milieu du siècle pour limiter le réchauffement à 1,5 °C³. Un pays est carboneutre lorsque ses émissions anthropiques de GES positives et négatives s'équivalent; c'est l'objectif du Canada pour 2050, toutes régions et tous secteurs économiques confondus.

L'Institut canadien pour des choix climatiques mise sur des études rigoureuses et indépendantes, des analyses révélatrices et une large mobilisation pour faire la lumière sur les enjeux climatiques du pays et les politiques transformatrices à adopter. Pour l'appuyer dans cette mission, Navius a évalué les options qui s'offrent au Canada pour atteindre la carboneutralité d'ici le milieu du siècle.

Cette étude explore les avantages et les désavantages des trajectoires potentielles vers la carboneutralité, quantifie l'incertitude associée à chacune et examine les priorités politiques à adopter.

Le présent rapport expose les conclusions de l'analyse selon la structure suivante :

- Chapitre 2 – Présentation du modèle gTech (outil d'analyse utilisé) et résumé des scénarios carboneutres étudiés et des principales hypothèses
- Chapitre 3 – Examen des principaux facteurs de réduction des émissions pour l'ensemble du Canada et les secteurs déterminants
- Chapitre 4 – Grands constats

Le modèle et les hypothèses associées aux scénarios sont explorés plus en détail dans les annexes.

¹ Parlement du Canada (2020). *Projet de loi C-12 : Loi concernant la transparence et la responsabilité du Canada dans le cadre de ses efforts pour atteindre la carboneutralité en 2050* : <https://parl.ca/DocumentViewer/fr/43-2/projet-loi/C-12/premiere-lecture>.

² Environnement et Changement climatique Canada (2016). *L'Accord de Paris* : <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/accord-paris.html>.

³ Rogelj et coll. (2018). « Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development », *Global Warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf.

2. Méthode analytique

Ce chapitre donne une vue d'ensemble de la méthode et du modèle employés pour projeter les trajectoires du Canada vers la carboneutralité. Nous y présentons la modélisation énergie-économie et notre modèle gTech (section 2.1) ainsi que les scénarios et les principales hypothèses de l'analyse (section 2.2).

2.1. Présentation du modèle gTech

Le système énergie-économie du Canada est complexe. La consommation d'énergie, qui est au cœur des émissions anthropiques de GES, dépend des décisions de millions de parties : ménages (choix de véhicules et de modes de chauffage), entreprises privées (installation de technologies écoénergétiques dispendieuses), municipalités (investissements dans le transport en commun), investisseurs (choix de financer des initiatives canadiennes ou étrangères), etc.

Tous les ordres de gouvernement du pays se sont donné des politiques encourageant ou obligeant les entreprises et les consommateurs à diminuer leurs émissions. Mais pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050, il faudra renforcer ces politiques ou en instaurer de nouvelles, de sorte à accroître les réductions.

Les politiques actuelles et futures qui permettront de réaliser cet objectif auront des répercussions les unes sur les autres et sur l'économie. Prenons par exemple les mesures visant les émissions du transport des personnes : norme fédérale sur les émissions des véhicules, tarification du carbone au provincial et au fédéral, politiques provinciales diverses (norme de la Colombie-Britannique sur les carburants à faible teneur en carbone, Norme sur les combustibles propres proposée par le fédéral, mandat sur les véhicules à émission zéro adopté par le Québec et proposé par la Colombie-Britannique, etc.); si les effets interactifs de telles politiques peuvent être complexes, ce n'est rien à côté des conséquences économiques potentielles du cocktail d'initiatives fédérales et provinciales.

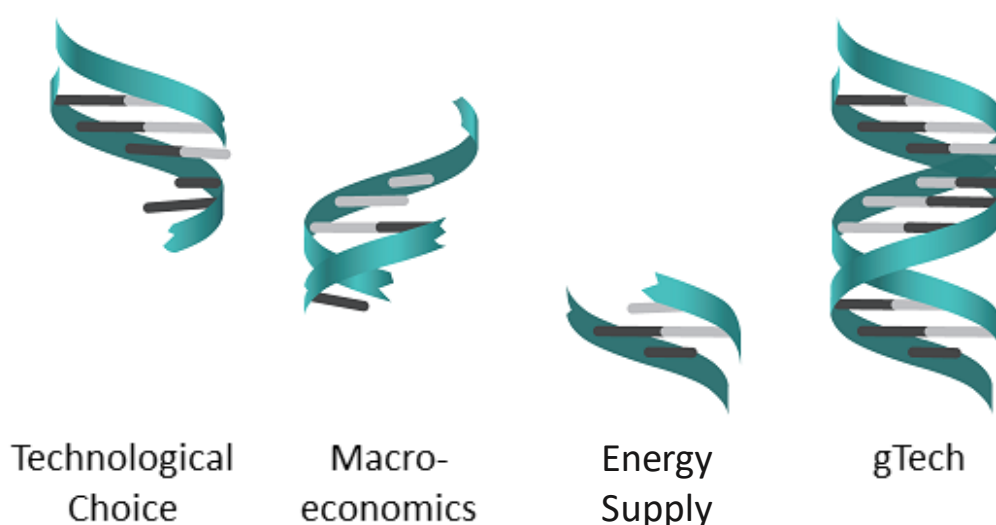
Ainsi, pour estimer les répercussions régionales, sectorielles, technologiques et économiques de la carboneutralité, il fallait un cadre de modélisation tout aussi sophistiqué que le système énergie-économie du Canada.

2.1.1. Aperçu du modèle gTech

L'analyse se base sur le modèle gTech de Navius, un modèle énergie-économie qui présente une combinaison inédite de caractéristiques :

- Une représentation réaliste des mécanismes qu'emploient les ménages et les entreprises pour sélectionner les technologies et les processus qui détermineront leur consommation d'énergie et leurs émissions de GES.
- Un portrait complet de l'économie globale, y compris les interactions entre les secteurs, les provinces et les territoires du Canada et avec le reste du monde.
- Une simulation détaillée de l'approvisionnement en énergie, y compris les combustibles liquides (pétrole brut et biocarburants) et gazeux (gaz naturel renouvelable et non renouvelable) et l'électricité.

Figure 1 : Modèle gTech



Le modèle gTech reprend trois modèles précédents de Navius (CIMS, GEEM et OILTRANS/IESD), combinant les forces de chacun en un cadre complet et intégré.

Simulation du choix des technologies

Le choix des technologies sera déterminant dans la réduction des émissions de GES au Canada. En effet, chaque fois qu'un ménage opte par exemple pour un véhicule électrique ou qu'une installation minière électrifie ses activités, les émissions du pays diminuent.

Le modèle gTech analyse en détail les types de technologies énergétiques à disposition des ménages et des entreprises. Au total, il tient compte de plus de 95 secteurs et de 300 technologies servant 70 utilisations finales (véhicules légers, chauffage résidentiel, chaleur industrielle, gestion du fumier agricole, etc.). Voir la liste exacte à l'annexe A.

De nombreux facteurs influent sur le choix des technologies. Le **Tableau 1** en résume les principaux et précise l'importance que gTech accorde à chacun.

Tableau 1 : Dynamique du choix des technologies selon le modèle gTech

Critère	Description
Coût d'achat (d'immobilisation)	Le coût d'achat équivaut simplement aux frais d'acquisition d'une technologie. Le coût des différentes technologies analysées se base sur des études de Navius. Dans les (rares) scénarios où ce critère est la seule différence entre deux technologies, les ménages et les entreprises priorisent l'option la plus abordable.
Coût énergétique	Le coût énergétique dépend de deux facteurs : 1) le prix de l'énergie (p. ex., en cents par litre d'essence); et 2) le besoin énergétique de la technologie (p. ex., la consommation de carburant par 100 km d'un véhicule). Le modèle gTech assigne un besoin énergétique fixe à toutes les technologies d'une catégorie (bien que l'efficacité énergétique puisse parfois être améliorée), mais fait varier le prix de l'énergie.
Préférence temporelle pour les immobilisations	<p>La plupart des technologies ont un coût d'achat et un coût énergétique, le premier devant généralement être couvert avant le second (p. ex., acheter une voiture avant d'acheter du carburant). Il faut donc considérer le rapport entre le coût d'immobilisation à court terme et le coût énergétique à long terme.</p> <p>Le modèle gTech illustre ce rapport à l'aide d'un taux d'actualisation (comparable au taux d'intérêt d'un emprunt), qui permet de déterminer si un ménage sera prêt à essayer un coût d'achat plus élevé pour réduire ses émissions ou sa consommation d'énergie à long terme.</p> <p>Au contraire de bon nombre de modèles énergétiques, qui emploient des taux d'actualisation « financiers » (généralement entre 5 % et 10 %), gTech utilise plutôt des taux réalistes (8 % à 25 %) pour mieux simuler les comportements des ménages et des entreprises face aux politiques climatiques. Cette décision se base sur de multiples études indiquant que les acheteurs évaluent leurs options en fonction de taux considérablement plus élevés que les taux d'actualisation financiers⁴. En effet, ces derniers risqueraient de mener à la surestimation des économies potentielles par rapport aux perceptions des ménages et des entreprises, engendrant ainsi des projections irréalistes.</p>
Préférences technologiques	En plus de leurs préférences vis-à-vis des coûts à court et à long terme, les ménages (et même les entreprises) privilégient certains types de technologies, souvent au point de faire fi de bien d'autres critères (y compris les critères financiers). Par exemple, certains acheteurs de véhicules se préoccupent d'autonomie ou de disponibilité des bornes de recharge, alors que pour d'autres c'est, le risque associé aux nouvelles technologies ou le statut social qui importent ⁵ . Le modèle quantifie ces préférences technologiques en leur attribuant un coût « non financier » dans l'algorithme de choix des technologies (avec la diversité des préférences – voir le critère suivant).

⁴ Voir par exemple : Rivers, N. et M. Jaccard (2006). « Useful models for simulating policies to induce technological change », *Energy policy*, vol. 34, n° 15, p. 2038-2047; Axsen, J., D. C. Mountain et M. Jaccard (2009). « Combining stated and revealed choice research to simulate the neighbor effect: The case of hybrid-electric vehicles », *Resource and Energy Economics*, vol. 31, p. 221-238.

⁵ Kormos, C., J. Axsen, Z. Long et S. Goldberg (2019). « Latent demand for zero-emissions vehicles in Canada (Part 2): Insights from a stated choice experiment », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 67, p. 685-702.

Critère	Description
Diversité des Canadiens	<p>Les Canadiens ne forment pas un groupe homogène : dans le choix d'une technologie, chacun est unique et priorise des facteurs différents. Par exemple, trois ménages voisins peuvent très bien opter respectivement pour une Toyota Prius, un VUS et le transport en commun.</p> <p>Le modèle gTech utilise une équation représentant les parts du marché : les technologies dont le coût net est le plus bas (selon l'ensemble de la dynamique présentée plus haut) occupent la plus grande part du marché, sans toutefois le monopoliser⁶. Plus une technologie est coûteuse par rapport aux autres, plus sa part du marché est petite.</p>
Évolution des coûts	<p>Les coûts des technologies ne sont pas fixes. Par exemple, le coût des véhicules électriques a grandement diminué dans les dernières années et devrait continuer de le faire⁷. Il en va de même pour de multiples autres appareils écoénergétiques et technologies de réduction des émissions. Le modèle gTech tient compte des baisses de coûts graduelles projetées et des économies potentielles associées à la production croissante d'une technologie.</p>
Politiques	<p>Les politiques gouvernementales sont déterminantes dans le choix des technologies. Les gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux orientent déjà les décisions des ménages et des entreprises à l'aide d'initiatives diverses : 1) programmes incitatifs couvrant une partie du coût d'achat de certaines technologies; 2) règlements imposant ou interdisant l'achat de certains groupes de technologies; 3) tarification du carbone augmentant le coût des carburants proportionnellement à leur teneur en carbone; 4) politiques fiscales (p. ex., décision d'appliquer ou non la TPS à une technologie donnée); et 5) règlements flexibles comme la Norme sur les combustibles propres du fédéral, qui vise à créer un marché pour les crédits carbone engendrés par un éventail d'activités définies.</p> <p>Le modèle gTech simule les répercussions qu'aurait la mise en œuvre coordonnée de toutes ces initiatives.</p>

⁶ Rivers, N. et M. Jaccard (2006). « Useful models for simulating policies to induce technological change », *Energy policy*, vol. 34, n° 15, p. 2038-2047.

⁷ Nykvist, B., F. Sprei et M. Nilsson (2019). « Assessing the progress toward lower-priced long range battery electric vehicles », *Energy Policy*, vol. 124, p. 144-155.

Simulation des répercussions macroéconomiques des politiques

En tant que modèle macroéconomique complet, le modèle gTech (un modèle d'équilibre général) offre une vue d'ensemble des répercussions économiques que peuvent avoir les politiques. Ses principales dynamiques macroéconomiques sont résumées au [Tableau 2](#).

Tableau 2 : Dynamiques macroéconomiques du modèle gTech

Dynamique	Description
Couverture exhaustive de l'activité économique	Le modèle gTech rend compte de toute l'activité économique du pays, telle que mesurée par Statistique Canada ⁸ . Il répertorie l'entièreté de l'activité sectorielle, du produit intérieur brut et du commerce de produits et de services, ainsi que les transactions entre les ménages, les entreprises et le gouvernement. Il est donc apte à simuler l'effet des politiques gouvernementales sur de nombreux indicateurs économiques (produit intérieur brut, investissements, revenus des ménages, emplois).
Équilibre économique complet	<p>gTech assure le retour à l'équilibre de tous les marchés (adéquation de l'offre et de la demande pour tous les biens et les services), ce qui implique que les décisions sectorielles aient des répercussions sur l'économie entière. Prenons par exemple une hausse de la demande d'électricité : la production devra augmenter, et avec elle les investissements et la demande de produits et de services dans le secteur de l'électricité, accroissant à son tour la demande de main-d'œuvre – et donc les salaires – dans la construction.</p> <p>Le modèle tient aussi compte des effets prix, notamment l'éventualité où le secteur de l'électricité rejeterait les coûts de mise en conformité sur les ménages, entraînant ainsi une réduction de la demande d'électricité (p. ex., priorisation d'autres carburants) et d'autres produits et services.</p>
Différences sectorielles	gTech analyse en détail les secteurs économiques du Canada, simulant les effets des politiques sur 95 d'entre eux, dont chacun offre des produits et des services différents (p. ex., minerais dans le secteur minier, services de transport dans le secteur du camionnage) requérant des intrants tout aussi différents.
Marché du travail et marché financier	Le modèle équilibre aussi le marché du travail et le marché financier. La disponibilité de la main-d'œuvre peut varier avec le taux réel de rémunération (salaire relatif à la consommation); lorsque ce dernier augmente, la main-d'œuvre se fait plus disponible. gTech tient aussi compte du chômage d'équilibre.
Interactions entre les régions	<p>L'activité économique du Canada dépend grandement des interactions entre les provinces et les territoires, avec les États-Unis et avec les autres pays. Le modèle rend compte de quatre types d'interactions interrégionales : 1) commerce de biens et de services; 2) mouvements de capitaux; 3) taxes gouvernementales (Canada seulement); et 4) transferts en tous genres entre les régions (p. ex., transferts du gouvernement fédéral aux provinces et aux territoires).</p> <p>Le modèle simule ces interactions et leur évolution suivant l'adoption de politiques dans les dix provinces, la région du Nord (les trois territoires) et les États-Unis.</p>

⁸ Statistique Canada. *Tableaux des ressources et des emplois* : <https://www150.statcan.gc.ca/n1/fr/catalogue/15-602-X>.

Dynamique	Description
Ménages	Les ménages dégagent des revenus de l'économie, qu'ils utilisent pour consommer différents produits et services. Le modèle tient compte de toutes ces dynamiques de consommation et des effets qu'ont sur elles les politiques.

Simulation des marchés d'approvisionnement en énergie

Le modèle gTech rend compte de tous les grands marchés d'approvisionnement en énergie, dont l'électricité, les produits pétroliers raffinés et le gaz naturel. Chacun est évalué en fonction de la disponibilité des ressources, des coûts de production provinciaux et des coûts et des contraintes (p. ex., capacité des pipelines) du transport d'énergie entre les régions.

Pour conformer les flux de carburants aux politiques, il est possible d'y ajouter des énergies sobres en carbone, comme l'électricité renouvelable ou la bioénergie. Pour projeter les conséquences économiques de l'approbation de pipelines et de l'adoption de politiques sur les biocarburants et la réduction des émissions, gTech analyse la disponibilité et le coût des matières premières.

Avantages à fusionner les dynamiques macroéconomiques et technologiques

En fusionnant les trois éléments présentés plus haut (technologie, macroéconomie et approvisionnement en énergie), le modèle gTech dresse un portrait complet des conséquences des politiques climatiques et énergétiques, permettant ainsi une analyse particulièrement poussée des trajectoires du Canada vers la carboneutralité et de leurs répercussions.

2.1.2. Étalonnage du modèle

Pour représenter fidèlement le système énergie-économie du Canada, gTech tire ses données de nombreuses sources différentes. Les émissions de GES sont étalonnées selon l'année de référence 2015, de sorte à correspondre aux données historiques du Rapport d'inventaire national d'Environnement et Changement climatique Canada⁹. Pour la période de 2015 à la dernière année comprise dans le rapport, la modélisation des émissions est aussi adaptée en fonction des tendances historiques. Cette façon de procéder augmente la fiabilité des projections. Notons toutefois que gTech vise les fluctuations à moyen et à long terme, et non les variations à court terme comme les

⁹ Environnement et Changement climatique Canada. *Rapport d'inventaire national* : <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/emissions-gaz-effet-serre/inventaire.html>.

cycles économiques. Ainsi, les modélisations peuvent être inexactes sur de courtes périodes.

Voici les principales sources utilisées pour l'étalonnage des données :

- Base de données complète sur la consommation d'énergie de Ressources naturelles Canada¹⁰ – tendances de consommation d'énergie et d'efficacité énergétique dans l'immobilier et le transport.
- Rapport d'inventaire national d'Environnement et Changement climatique Canada¹¹ – émissions sans combustion et relations entre les émissions des catégories du GIEC et des secteurs économiques du Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN).
- Tableaux des ressources et des emplois de Statistique Canada¹² – structure économique du Canada (activité sectorielle, PIB, commerce de biens et de services, transactions entre les ménages, les entreprises, le gouvernement et les régions).
- Enquête annuelle sur la consommation industrielle d'énergie de Statistique Canada¹³ – consommation industrielle d'énergie selon le combustible.
- Rapport sur la viabilité financière du Bureau du directeur parlementaire du budget¹⁴ – tendances relatives au PIB et à la main-d'œuvre.

2.1.3. Limite des projections

Même avec les meilleures méthodes et hypothèses qui soient, l'évolution du système énergie-économie du Canada demeure incertaine. Notamment, les projections des émissions de GES sont exposées à deux grands facteurs d'incertitude.

Premièrement, tout modèle est une représentation simplifiée de la réalité. Concrètement, le modèle gTech est une série d'équations mathématiques visant à projeter l'avenir, ce qui soulève deux questions : « Les équations sélectionnées permettent-elles une simulation réaliste? » et « Négligent-elles des facteurs qui pourraient être centraux? »

¹⁰ Ressources naturelles Canada. *Base de données complète sur la consommation d'énergie* :

https://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/menus/evolution/tableaux_complets/liste.cfm.

¹¹ Environnement et Changement climatique Canada. *Rapport d'inventaire national* :

<https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/emissions-gaz-effet-serre/inventaire.html>.

¹² Statistique Canada. *Tableaux des ressources et des emplois* : <https://www150.statcan.gc.ca/n1/fr/catalogue/15-602-X>.

¹³ Statistique Canada. *Enquête annuelle sur la consommation industrielle d'énergie* : www.statcan.gc.ca.

¹⁴ Bureau du directeur parlementaire du budget. *Rapport sur la viabilité financière de 2020* : <https://www.pbo-dpb.gc.ca/fr/blog/news/RP-1920-029-S-fiscal-sustainability-report-2020-rapport-viabilite-financiere-2020>.

L'utilité des modèles informatiques d'équilibre général (comme gTech) est bien établie dans la littérature scientifique. De plus, Navius a investi des efforts considérables dans l'étalonnage et l'analyse rétrospective de son modèle, de sorte à ne négliger aucune des grandes dynamiques énergie-économie présentées plus haut.

Toutefois, gTech ne tient pas compte de tous les moteurs de l'évolution technologique. Les décisions des ménages et des entreprises, par exemple, dépendent de nombreux facteurs que même le plus complexe des modèles ne saurait rendre pleinement. Quoi que l'on fasse, quasiment toutes les projections du système énergie-économie différeront de la réalité dans une certaine mesure.

Deuxièmement, les hypothèses utilisées pour paramétrer le modèle – prix du pétrole, amélioration de la productivité du travail, stabilité du climat, etc. – ne demeurent que des conjectures. Si l'une d'entre elles s'avère incorrecte, les projections pourraient être faussées. Nous avons examiné certaines des incertitudes inhérentes à ces hypothèses à l'aide d'une analyse de sensibilité, présentée dans la section suivante.

En bref, gTech est le modèle le plus complet qui existe pour projeter les répercussions techno-économiques des politiques climatiques canadiennes. Sa représentation des changements technologiques, des dynamiques macroéconomiques et des marchés des combustibles (décrits plus haut) en fait l'outil idéal pour étudier les conséquences de l'objectif de 2050 sur les technologies, la consommation d'énergie, les émissions de GES et l'économie. Cela dit, aucun modèle ne saurait réellement prévenir l'avenir, pas même gTech.

2.1.4. Méthode de décomposition

Une fois les scénarios carboneutres simulés, gTech répartit les réductions des émissions selon de grandes mesures d'atténuation; les réductions sont similaires pour toutes les trajectoires, mais les facteurs qui en sont responsables varient. Ces facteurs peuvent être étudiés à l'aide d'une méthode de décomposition.

Dans chaque scénario, les émissions sont décomposées en cinq facteurs à l'aide de l'équation suivante :

$$GES = E \times \sum_p \frac{S_p}{E} \times \sum_{uf} \frac{UF_{p,uf}}{S_p} \times \sum_t \frac{T_{p,uf,t}}{UF_{p,uf}} \times \frac{GES_{p,uf,t}}{T_{p,uf,t}}$$

Légende : l'extrant (E) représente la production totale de biens et de services; la part sectorielle de l'extrant (S_p/E) représente les produits qui peuvent être fabriqués avec différentes intensités d'émissions par plus d'un secteur; l'efficacité énergétique de l'utilisation finale ($UF_{p,uf}/S_p$) tient compte de l'évolution de la demande d'utilisations

polluantes; la part de technologie ($T_{p,uf,t}/UF_{p,uf}$) représente la part d'une technologie sobre en carbone ($T_{p,uf,t}$) utilisée pour répondre à une demande d'utilisation finale ($UF_{p,uf}$); et l'intensité des émissions de GES ($GES_{p,uf,t}/T_{p,uf,t}$) représente l'intensité d'émissions d'une technologie donnée. Les résultats de cette analyse de décomposition permettent d'illustrer en détail les facteurs derrière l'évolution des émissions dans les différents scénarios carboneutres. La méthodologie de décomposition de Navius est développée à l'annexe B.

2.2. Scénarios et hypothèses

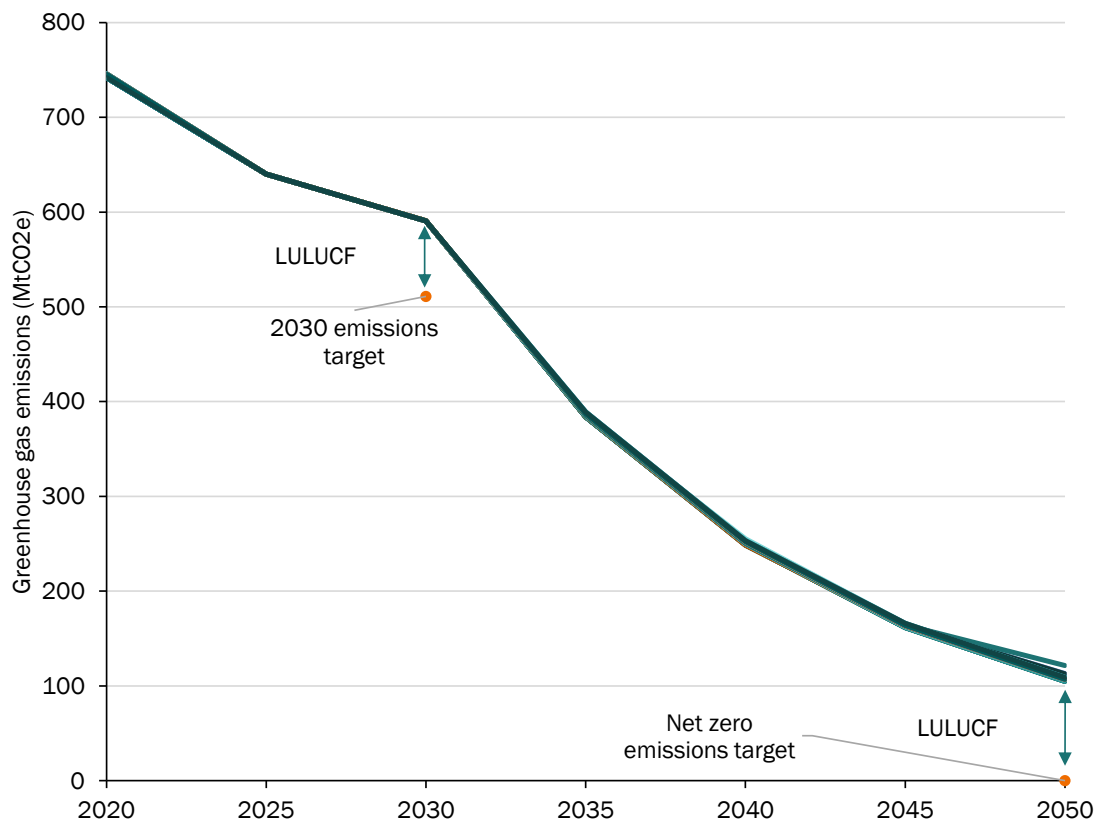
Nous avons utilisé le modèle gTech pour projeter de multiples scénarios carboneutres potentiels. Cette section explique comment ces derniers ont été conçus et décrit les variations appliquées aux hypothèses principales pour représenter l'incertitude entourant l'avenir du Canada.

2.2.1. Définition de la carboneutralité

Nous définissons la carboneutralité comme la réduction à zéro des émissions nettes de GES au Canada d'ici le milieu du siècle, toutes régions et tous secteurs économiques confondus. Elle se traduit dans le modèle par des plafonds d'émissions simulant un système national de plafonnement et d'échange, soit un plafond de zéro émission nette en 2050, un plafond de 511 Mt éq. CO₂ en 2030 (cible du Canada) et des plafonds intermédiaires quinquennaux. Le tout est illustré à la Figure 2.

Le potentiel d'atténuation de l'affectation des terres, du changement d'affectation des terres et de la foresterie (ATCATF) n'a pas été directement modélisé. Il a plutôt été représenté par un volume fixe d'émissions négatives disponibles d'ici 2050, déterminé à partir d'une analyse en cours de Nature United. Il a été estimé à 80 Mt éq. CO₂ pour l'année 2030 et 105 Mt éq. CO₂ pour l'année 2050, selon les réductions permises par le boisement, la gestion forestière, l'agriculture et les milieux humides. Ces solutions viennent combler la différence entre les émissions des trajectoires étudiées et les cibles du Canada pour 2030 et 2050 (voir la figure 2). Les variations observées entre les scénarios en 2050 sont attribuables à de légères différences dans le potentiel d'atténuation présumé de l'ATCATF.

Figure 2 : Courbe des émissions de GES, toutes trajectoires confondues



Tous les secteurs disposent de nombreuses options pour réaliser les réductions nécessaires à l'atteinte de la carboneutralité. Le modèle sélectionne les plus réalistes selon les habitudes des consommateurs, la disponibilité technologique et la rentabilité à long terme. On trouve parmi les options des changements sectoriels et de modes de production, le remplacement des procédés, des combustibles et des technologies et la modification des revenus, des préférences et des habitudes. Les possibilités varient d'un secteur à l'autre; en voici deux exemples.

Exemple 1 : transport des personnes

Il existe plusieurs façons d'atténuer les émissions associées au transport des personnes. Notamment, les Canadiens pourraient réduire leur utilisation de l'automobile, en réponse à une fluctuation des revenus ou par simple choix (autopartage, transport en commun). Ils pourraient aussi opter pour des véhicules moins polluants, en faisant des compromis sur la taille (voiture plutôt que VUS), le moteur (moteur électrique, pile à combustible, moteur thermique efficace) ou le carburant (électricité, hydrogène, mélange de biocarburants). Il y aurait aussi moyen de diminuer les émissions engendrées par la production de carburant, par exemple en employant des processus fonctionnant à l'électricité propre, en augmentant la proportion de biocarburants ou en dotant les usines de technologies de captation et

de piégeage du carbone. Il serait même possible de complètement changer les modes de production, par exemple en remplaçant le gaz naturel dans la production d'hydrogène par de l'électricité ou de la biomasse. Toutes ces options sont simulées dans l'analyse afin de faciliter la décarbonisation du secteur des véhicules légers d'ici 2050.

Exemple 2 : production sidérurgique

La production sidérurgique canadienne est concentrée en Ontario et au Québec. Les émissions qui y sont associées peuvent être atténuées de plusieurs façons. Premièrement, le secteur pourrait ajuster sa production, possiblement en la revoyant à la baisse. Deuxièmement, il pourrait changer ses processus d'affinage de l'acier, par exemple en troquant les convertisseurs basiques à oxygène (CBO) contre le fer de réduction directe (FRD) et les fours électriques à arc – qui permettraient aussi de recycler davantage d'acier. Troisièmement, il y aurait moyen de changer le combustible utilisé dans les processus de production. La production de FRD pourrait notamment être alimentée à l'hydrogène plutôt qu'au gaz naturel, ce qui serait moins polluant. Toutes ces options d'atténuation sont simulées dans l'analyse afin de faciliter la décarbonisation du secteur sidérurgique d'ici 2050.

La liste complète des solutions pour chaque secteur est présentée à l'annexe C.

À noter que certaines des solutions connues n'ont pas encore été intégrées au modèle gTech ou ont été exclues de l'analyse en raison d'une trop grande incertitude ou dépendance aux interventions politiques, notamment les suivantes : transport par train à grande vitesse, énergie nucléaire au thorium, petits réacteurs nucléaires modulaires, et infrastructures de transport à grande distance de combustible hydrogène. Ont aussi été omises certaines solutions pouvant réduire davantage les émissions, comme l'intégration complète des secteurs de l'hydrogène et de la production d'électricité, la multiplication des interconnexions électriques entre les régions et diverses autres tendances récentes (p. ex., viande synthétique).

2.2.2. Élaboration des scénarios

Nous avons simulé un total de 62 trajectoires carboneutres pour le Canada. Les scénarios ont été élaborés indépendamment des politiques; la seule constante était l'exigence d'atteindre la carboneutralité d'ici la moitié du siècle. Ainsi, ils présentent

tous les mêmes réductions des émissions, mais proposent des mesures d'atténuation différentes pour y parvenir¹⁵.

Puisque l'avenir du système énergie-économie du Canada est incertain, nous avons dû émettre plusieurs hypothèses dans notre analyse. Pour compenser l'imprévisibilité des tendances technologiques et de l'évolution du contexte mondial, nous avons varié d'un scénario à l'autre les hypothèses concernant quatre grands facteurs d'incertitude :

1. Disponibilité et coût des technologies sobres en carbone

- Évolution du prix des véhicules électriques à batterie
- Coût de la production de combustible hydrogène
- Évolution du prix des véhicules à hydrogène

Il existe deux modes d'approvisionnement en hydrogène pour les centres de distribution : la production centralisée (transport de l'hydrogène par camion d'une grande usine aux centres) et la production décentralisée (exploitation de petites usines à proximité des centres). L'analyse suppose aussi la disponibilité du vaporeformage de méthane avec et sans CSC (le carbone étant acheminé aux sites de stockage par des pipelines), de systèmes d'électrolyse décentralisés et d'une gazéification centralisée de la biomasse. Les scénarios supposent le transport de l'hydrogène par camion ou par train, étant donné l'absence de réseau pipelinier approprié au Canada. Le modèle gTech ne rend pas encore compte d'une éventuelle centralisation de l'électrolyse, mais nous estimons que cette option serait peu rentable en raison des coûts de transport.

- Restrictions sur l'ajout d'hydrogène dans le système de gaz naturel

L'âge des pipelines et des utilisations finales impose certaines contraintes techniques et de sécurité. Le vaporeformage de méthane sans CSC n'étant pas moins émetteur que le gaz naturel, cette option est omise de l'analyse.

¹⁵ Si les politiques ou les combinaisons de politiques qui permettent de réduire les émissions sont nombreuses (taxe sur le carbone, système de plafonnement et d'échange, permis d'émission négociables, règlements prescriptifs ou flexibles visant l'économie entière ou une industrie précise, etc.), elles ont toutes des répercussions différentes. C'est pourquoi il est important de garder en tête les différentes options de politiques associées à chaque scénario. Ici, nous avons instauré un plafond d'émissions pour simuler l'atteinte des cibles climatiques par des politiques rentables, mais les conséquences économiques et autres de la carboneutralité seront appelées à varier selon les politiques adoptées.

- Disponibilité de nouvelles sources stables d'énergie propre (p. ex., nucléaire, géothermique)
- Disponibilité des biocarburants de deuxième génération (p. ex., provenant du panic érigé)
- Diminution future des intensités d'émissions dans le secteur des sables bitumineux

2. Disponibilité des technologies à émissions négatives

- Disponibilité de la captation atmosphérique directe (CAD)
- Disponibilité de la CSC pour les émissions provenant de la combustion

Le modèle gTech considère la CSC pour plusieurs utilisations finales : formation de gaz naturel, production de ciment, production d'hydrogène par vaporeformage de méthane, centrale au charbon pulvérisé, gaz naturel à cycle combiné, et production de chaleur industrielle avec des chaudières à charbon et à gaz naturel. Il analyse aussi deux technologies de séparation du CO₂ : la séparation post-combustion (gaz de carneau) pour les technologies de combustion et la séparation en cours de procédé pour les émissions produites par des procédés industriels.

3. Politiques étrangères et concurrence

- Politiques climatiques des autres pays

Comme le modèle gTech simule explicitement le commerce bilatéral entre le Canada et les États-Unis, il simule également les politiques climatiques de ces derniers. Comme il ne peut toutefois pas en faire autant avec le reste du monde, nous avons utilisé l'évolution du coût des marchandises pour représenter les interactions entre l'Amérique du Nord et le reste du monde en matière de commerce et de politiques. Bien qu'il soit plus courant d'utiliser des valeurs fixes, cette stratégie n'aurait pas reflété adéquatement l'éventuelle adoption de politiques climatiques carboneutres par les autres pays.

- Mesures pour assurer la compétitivité des secteurs canadiens hautement émetteurs présents sur les marchés internationaux

En présence d'une tarification du carbone ou d'un système de plafonnement et d'échange, nous devons poser des hypothèses quant à la répartition des revenus générés. Dans certains des scénarios analysés, les revenus sont entièrement redistribués aux ménages; dans les autres, une partie des

revenus est initialement retournée aux entreprises privées sous forme de crédits d'émissions gratuits, mais diminue graduellement avec les émissions jusqu'à disparaître. Ces deux options ont des répercussions économiques différentes. Le fait de redonner aux ménages atténue les conséquences des politiques dans certaines sphères de l'économie (les ménages), mais les accentue dans d'autres (les entreprises privées). À noter que la mise en place de mesures de protection contre la concurrence limiterait les effets de la tarification du carbone sur les entreprises.

4. Prix des marchandises

- Évolution du prix du pétrole

Les hypothèses émises quant à chacun des facteurs d'incertitude et leur variation selon le scénario sont présentées au Tableau 3. La liste des 62 scénarios analysés se trouve à l'annexe D.

Tableau 3 : Résumé des principales hypothèses examinées dans l'analyse d'incertitude¹⁶

Facteur d'incertitude	Hypothèse		Source
	Scénario de référence	Estimation basse / indisponibilité	
Coût des véhicules électriques à batterie	Baisse du coût des blocs-batterie de 502 \$/kWh à 84 \$/kWh.	Baisse du coût des blocs-batteries à 75 \$/kWh.	Bloomberg New Energy Finance (2017, 2019, 2020). <i>Electric vehicle outlook</i> .
	Le prix des véhicules électriques à batterie descend, selon le taux d'adoption, jusqu'à 23 700 \$ (25 100 \$ avec le chargeur) d'ici 2030 (marge de profit de 30 % et châssis ¹⁷ de 12 000 \$).	Le prix des véhicules électriques à batterie descend jusqu'à 22 120 \$ (23 540 \$ avec le chargeur) d'ici 2030 (même marge de profit et châssis que le scénario de référence).	--
Coût de la production d'hydrogène – vaporeformage de méthane	L'hydrogène est produit à même de petites centrales de vaporeformage à proximité des centres de distribution (option la plus rentable pour cette technologie). Le coût nivelé de la production et de la distribution d'hydrogène s'élève à 5 \$/kg ou 35 \$/GJ _{PCS} ¹⁸ (taux d'actualisation de 10 %, projet à durée de 30 ans, 4,9 \$/GJ).	Ce scénario présume une utilisation des centres à 95 % de leur capacité, avec un coût nivelé de 10 % inférieur à celui du scénario de référence.	National Renewable Energy Laboratory (2019). <i>H2A Hydrogen Production Analysis</i> .
	Ce scénario présume une utilisation des centres à 86 %, sans baisse des coûts d'immobilisation.		--

¹⁶ Sauf mention contraire, tous les prix sont en dollars canadiens de 2020.

¹⁷ Le châssis comprend toutes les parties du véhicule qui ne changent pas avec la technologie (cadre, roues, suspension, fenêtres, sièges, intérieur, etc.).

¹⁸ Pouvoir calorifique supérieur de 140 MJ/kg.

Facteur d'incertitude	Hypothèse		Source	
	Scénario de référence	Estimation basse / indisponibilité		Estimation élevée / disponibilité
Coût de la production d'hydrogène – gazéification de la biomasse	Installations de gazéification centralisées. L'hydrogène est transporté par camion, dans les limites des centres urbains (rayon de 100 km). Le coût nivelé de la production, du transport et de la distribution d'hydrogène s'élève à 7,9 \$/kg ou 56 \$/GJ _{Pcs} (taux d'actualisation de 10 %, projet à durée de 30 ans, 88 \$/tonne de biomasse).	Ce scénario présume une utilisation des centres à 95 % de leur capacité, avec un coût nivelé de 10 % inférieur à celui du scénario de référence.	--	National Renewable Energy Laboratory (2019). <i>H2A Hydrogen Production Analysis</i> . Agence internationale de l'énergie (2019). <i>The Future of Hydrogen</i> .
	Ce scénario présume une utilisation des centres à 86 %, sans baisse des coûts d'immobilisation.			
Coût de la production d'hydrogène – électrolyse	L'hydrogène est produit à même de petites centrales d'électrolyse à membrane échangeuse de protons (MEP) à proximité des centres de distribution (option de raccordement au réseau électrique la plus rentable pour cette technologie). Le coût nivelé de la production et de la distribution d'hydrogène s'élève à 9,7 \$/kg ou 70 \$/GJ _{Pcs} (taux d'actualisation de 10 %, projet à durée de 30 ans, 6,2 ¢/kWh d'électricité).	Ce scénario présume des coûts d'immobilisation minimaux pour les centrales d'électrolyse à MEP ainsi qu'une utilisation des centres à 95 %, pour un coût nivelé de 20 % inférieur à celui du scénario de référence.	--	National Renewable Energy Laboratory (2019). <i>H2A Hydrogen Production Analysis</i> .
	Ce scénario présume une utilisation des centres à 86 %, sans baisse des coûts d'immobilisation.			

Facteur d'incertitude	Scénario de référence	Hypothèse		Source
		Estimation basse / indisponibilité	Estimation élevée / disponibilité	
Coût des véhicules électriques à hydrogène	Baisse du coût des batteries de piles à combustible de 306 \$/kW en 2015 à 74 \$/kW.	Baisse plus rapide des coûts.		SA Consultants (2016). <i>Final report: Hydrogen storage system cost analysis.</i>
	Baisse du coût des réservoirs de carburant de 31 \$/kWh en 2015 à 11 \$/kWh.	Les coûts des batteries de piles à combustible et des réservoirs d'hydrogène descendent à 39 \$/kW, et le coût des réservoirs de carburant, à 9,9 \$/kWh.	--	SA Consultants (2017). <i>Mass production cost estimation of direct H₂ PEM fuel cell systems for transportation applications.</i>
	Le prix des véhicules à pile à combustible descend, selon le taux d'adoption, jusqu'à 32 810 \$ d'ici 2050 (marge de profit de 30 % et châssis ¹⁹ de 12 000 \$).	Le prix des véhicules à pile à combustible descend jusqu'à 23 825 \$ (même marge de profit et châssis que le scénario de référence).		Agence internationale de l'énergie (2020). <i>Breakdown of cost-reduction potential for electrochemical devices by component category.</i>
Volume d'hydrogène ajouté au système de gaz naturel	Le flux de gaz naturel peut supporter un volume de 2 % d'hydrogène (0,5 % de la teneur en énergie).	--	Le flux de gaz naturel peut supporter un volume de 20 % d'hydrogène (5 % de la teneur en énergie).	Agence internationale de l'énergie (2019). <i>The Future of Hydrogen.</i>
				Atfeld K., D. Pinchbeck (2013). <i>Admissible Hydrogen Concentrations in Natural Gas Systems.</i> Conseil national de recherches du Canada (2017). <i>Review of hydrogen tolerance of key Power-to-Gas (P2G) components and systems in Canada: final report.</i>

¹⁹ Le châssis comprend toutes les parties du véhicule qui ne changent pas avec la technologie (cadre, roues, suspension, fenêtres, sièges, intérieur, etc.).

Facteur d'incertitude	Scénario de référence	Hypothèse		Source
		Estimation basse / indisponibilité	Estimation élevée / disponibilité	
Disponibilité de nouvelles sources stables d'énergie propre	--	Non disponibles.	Disponibles. Coût de production fixe avoisinant 155 \$/MWh.	Agence d'information sur l'énergie (2019). <i>Annual Energy Outlook</i> .
Disponibilité des biocarburants de deuxième génération	--	Non disponibles.	Disponibles. Le coût pré-transport des matières premières s'élève à 84 \$/t.a. pour les déchets agricoles et à 97 \$/t.a. pour les déchets forestiers. La disponibilité et le coût de ces deux types de matières premières sont généralisés à toutes les matières premières de deuxième génération qui ne sont pas directement modélisées (p. ex., panic érigé).	Kludze, H., B. Deen, A. Weersink, R. van Acker, K. Janovicek, A. De Laport et I. McDonald (2013). « Estimating sustainable crop residue removal rates and costs based on soil organic matter dynamics and rotational complexity », <i>Biomass and Bioenergy</i> , vol. 56, p. 607-618. Petrolia, D. R. (2008). « The economics of harvesting and transporting corn stover for conversion to fuel ethanol: A case study for Minnesota », <i>Biomass and Bioenergy</i> , vol. 32, p. 603-612. Yemshanov D., D. W. McKenney, S. Fraleigh, B. McConkey, T. Huffman et S. Smith (2014). « Cost estimates of post-harvest forest biomass supply for Canada », <i>Biomass and Bioenergy</i> , vol. 69, p. 80-94.

Facteur d'incertitude	Hypothèse		Source	
	Scénario de référence	Estimation basse / indisponibilité		Estimation élevée / disponibilité
Intensité des émissions de l'exploitation de sables bitumineux	Réduction de référence.		Réduction accélérée.	BMO Marchés des capitaux (2019). <i>ESG, Yeah You Know Me: Innovation and the Search for 'Friendly Oil'</i> , février 2019.
	La réduction des émissions associées aux sables bitumineux se chiffre à 0,03 t d'éq. CO ₂ /baril pour l'exploitation minière et à 0,07 t d'éq. CO ₂ /baril pour la production in situ d'ici 2030, et à 0,02 t/baril et 0,05 t/baril respectivement d'ici 2050.	--	Les totaux d'émissions associées à l'exploitation de sables bitumineux sont 20 % plus bas que ceux du scénario de référence pour 2030, et 30 % plus bas pour 2050.	
Disponibilité de la CAD	--	Non disponible.	Disponible. Le coût de la CAD s'élève initialement à 368 \$/t d'éq. CO ₂ et diminue à mesure que s'accumule l'expérience de ces technologies, atteignant un plancher de 125 \$/t d'éq. CO ₂ en 2050.	Fasihi et coll. (2019). <i>Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants</i> . Keith et coll. (2018). <i>A process for capturing CO₂ from the atmosphere</i> .

Facteur d'incertitude	Scénario de référence	Hypothèse		Source
		Estimation basse / indisponibilité	Estimation élevée / disponibilité	
Disponibilité de la CSC	--	<p>Non disponible pour les émissions dues à la combustion.</p> <p>La CSC demeure possible dans une certaine mesure pour les émissions sans combustion, par exemple les émissions des procédés associés à la production d'hydrogène, de ciment et d'engrais.</p>	<p>Disponible pour les émissions dues à la combustion et les émissions des procédés. Taux de captation de 90 %.</p> <p>Le coût varie selon les emplois finaux, oscillant entre 20 \$ et 120 \$/t d'éq. CO₂ pour les émissions sans combustion et entre 50 \$ et 150 \$/t d'éq. CO₂ pour les autres. Il diffère aussi d'une région à l'autre, en raison de coûts associés au transport et au stockage allant de 3,6 \$/t d'éq. CO₂ en Alberta à 17,9 \$/t d'éq. CO₂ en Colombie-Britannique.</p>	<p>Global CCS Institute (2017). <i>Global Costs of Carbon Capture and Storage: 2017 Update</i>.</p> <p>Agence internationale de l'énergie (2011). <i>Cost and Performance of Carbon Dioxide Capture from Power Generation</i>.</p>
		<p>Le coût de la captation des émissions sans combustion varie entre 20 \$ et 120 \$/t d'éq. CO₂, selon l'utilisation finale, plus des coûts de transport et de stockage allant de 3,6 \$/t d'éq. CO₂ en Alberta à 17,9 \$/t d'éq. CO₂ en Colombie-Britannique.</p>	<p>Les États-Unis adoptent des politiques visant à réduire leurs émissions de 80 % d'ici 2050.</p> <p>Les prix internationaux des marchandises sont ajustés en fonction des coûts de production dans un contexte carboneutre en Amérique du Nord, de sorte à simuler la mise en œuvre de politiques climatiques dans le reste du monde.</p>	--
Politiques climatiques des autres pays	--	<p>Le Canada met en place des politiques pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050, tandis que les États-Unis et le reste du monde continuent de suivre la trajectoire de référence.</p>	<p>Les États-Unis adoptent des politiques visant à réduire leurs émissions de 80 % d'ici 2050.</p> <p>Les prix internationaux des marchandises sont ajustés en fonction des coûts de production dans un contexte carboneutre en Amérique du Nord, de sorte à simuler la mise en œuvre de politiques climatiques dans le reste du monde.</p>	--

Facteur d'incertitude	Scénario de référence	Hypothèse		Source
		Estimation basse / indisponibilité	Estimation élevée / disponibilité	
Mesures de protection de la concurrence (système de tarification fondé sur le rendement – STFR)	--	Sans STFR.	Avec un STFR.	--
Prix international du pétrole ²⁰	66 \$ d'ici 2030 et 88 \$ d'ici 2050 (dollars américains de 2020).	39 \$ d'ici 2030 et 37 \$ d'ici 2050 (dollars américains de 2020).	--	Régie de l'énergie du Canada (2019). <i>Avenir énergétique du Canada en 2019</i> . Régie de l'énergie du Canada (2018). <i>Avenir énergétique du Canada en 2018</i> .

²⁰ Dans tous les scénarios où le prix international du pétrole est faible, la CAD et la CSC sont considérées comme impossibles pour les émissions dues à la combustion, et dans tous ces scénarios sauf deux, les États-Unis et le reste du monde adoptent des politiques climatiques carboneutres. Voir l'annexe D pour la liste complète des hypothèses.

2.2.3. Autres hypothèses importantes

Activité économique

Les chiffres de référence pour la croissance de l'économie et de la population active du Canada proviennent du *Rapport sur la viabilité financière* du Bureau du directeur parlementaire du budget²¹. Les PIB sectoriels projetés se basent largement sur cette croissance ainsi que sur la productivité relative du capital et du travail (la valeur des biens et des services produits pour des intrants de capital et de travail donnés).

À noter que les scénarios analysés ne tiennent pas compte des répercussions économiques de la COVID-19, qui sont encore inconnues au moment de la rédaction du présent rapport.

Prix du pétrole et du gaz

Pour calculer les prix du pétrole et du gaz, nous avons repris les données externes du rapport *Avenir énergétique du Canada en 2019* de la Régie de l'énergie du Canada²². Nous les avons ensuite ajustées à l'interne, selon l'offre et la demande de gaz naturel en Amérique du Nord. Le prix du pétrole est un intrant exogène au modèle (basé sur un prix international déterminé). Les chiffres exacts employés dans l'analyse sont présentés au Tableau 4.

Tableau 4 : Prix du pétrole et du gaz naturel du modèle gTech

		2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Prix du pétrole (en dollars américains de 2020 par baril)	Référence	58,0	62,8	66,4	71,4	76,8	82,2	87,6
	Faible	54,1	39,4	39,3	39,0	38,4	37,9	37,3
Prix du gaz naturel (en dollars américains de 2020 par million de BTU)	Référence	2,7	3,3	3,5	3,5	3,9	4,4	4,6
	Faible	2,7	3,3	3,5	3,5	3,7	3,6	4,0

²¹ Bureau du directeur parlementaire du budget (2020). *Rapport sur la viabilité financière de 2020* : <https://www.pbo-dpb.gc.ca/fr/blog/news/RP-1920-029-S-fiscal-sustainability-report-2020-rapport-viabilite-financiere-2020>.

²² Régie de l'énergie du Canada (2019). *Avenir énergétique du Canada en 2019 : offre et demande énergétiques à l'horizon 2040*, <https://www.cer-rec.gc.ca/fr/donnees-analyse/avenir-energetique-canada/2019/index.html>.

Offre et coût des biocarburants

On retrouve parmi les biocarburants de deuxième génération des combustibles liquides et gazeux produits à partir de matières premières ligno-cellulosiques; il peut s'agir d'éthanol cellulosique ainsi que d'essence, de diesel et de gaz naturel renouvelables provenant de matières organiques ligneuses ou herbeuses. Ces carburants se distinguent des biocarburants de première génération, comme l'éthanol de féculents et le biodiesel, ainsi qu'à la production de gaz renouvelables à partir de matières en décomposition (déchets alimentaires et fumier de vache).

Les matières premières que répertorie gTech pour les biocarburants de deuxième génération sont les déchets agricoles et forestiers qui peuvent être extraits sans conséquence pour la fertilité des sols, soit les parties des plantes abandonnées après la récolte (cannes de maïs, paille de blé, etc.) et les branches et les cimes laissées sur le bord des chemins forestiers après l'abattage des arbres. La disponibilité des déchets varie pour chaque année et chaque source examinée, selon les activités agricoles et forestières. Tout changement dans ces activités risque de faire fluctuer le volume de déchets (plus les secteurs seront actifs au Canada et aux États-Unis, plus ils produiront de déchets). Cependant, le modèle gTech restreint la production agricole à une superficie donnée et ignore donc tout emballage de la production de déchets ou de matières premières utilisées dans les biocarburants de première génération (maïs, blé, etc.).

Le Tableau 5 : Production canadienne présumée de matières premières pour biocarburants de deuxième génération illustre la disponibilité présumée des matières premières pour biocarburants de deuxième génération à l'année de référence de gTech. Les chiffres représentent la masse sèche (p. ex., en tonnes anhydres, ou t.a.).

Tableau 5 : Production canadienne présumée de matières premières pour biocarburants de deuxième génération

	Déchets agricoles ^{23,24}	Déchets forestiers ^{25,26}	Total
Déchets disponibles à l'année de référence (en millions de t.a./an)	18,2	15,7	33,9
Déchets disponibles à l'année de référence (en PJ/an)	328	238	566

²³ Agriculture et Agroalimentaire Canada (2017). Valeurs médianes de l'inventaire de biomasse agricole : <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/0ccc7c21-c9ef-499f-8713-91b55357472a>.

²⁴ Statistique Canada, CANSIM 001-0017.

²⁵ Yemshanov D., D. W. McKenney, S. Fraleigh, B. McConkey, T. Huffman et S. Smith (2014). « Cost estimates of post-harvest forest biomass supply for Canada », *Biomass and Bioenergy*, vol. 69, p. 80-94.

²⁶ Gouvernement du Canada, Base de données nationale sur les forêts, consultée le 28 mai 2018.

Potentiel de production accrue	Modeste – Dépend de la production de nourriture.	Modeste – L'activité forestière se maintient généralement sous la possibilité de coupe annuelle, ce qui signifie que le volume de déchets pourrait croître advenant une demande suffisante de produits ligneux.
--------------------------------	--	---

L'analyse exclut les déchets générés par les usines de produits forestiers, les déchets de bois urbain et les cultures énergétiques; ces dernières sont écartées en raison de la grande incertitude entourant leur potentiel et leurs répercussions sur les émissions de GES²⁷. Nous écartons aussi l'abattage dans l'objectif de produire des déchets, qui serait trop dispendieux (en \$/t.a.) et n'assurerait probablement pas de réduction nette des émissions.

Les coûts attribués aux déchets agricoles et forestiers dans gTech sont résumés au Tableau 6. Le coût d'acheminement aux centrales des déchets agricoles équivaut à la somme de leur coût de production (récolte et remplacement des nutriments) et des frais de transport^{28,29}; celui des déchets forestiers équivaut au coût estimé de l'exploitation additionné aux frais de transport vers la centrale de cogénération de biomasse la plus proche (lieu plausible de traitement des matières premières)³⁰.

Tableau 6 : Coûts des matières premières pour biocarburants de deuxième génération (dollars canadiens de 2020/t.a.)

	Déchets agricoles	Déchets forestiers
Coûts de la production ou de l'exploitation	39 \$	63 \$
Coût du transport aux centrales	7 \$	34 \$
Remplacement des nutriments	38 \$	-
Coût total d'acheminement aux centrales	84 \$	97 \$

²⁷ Ministère américain de l'Énergie (2016). *2016 Billion-Ton Report*.

²⁸ Kludze, H., B. Deen, A. Weersink, R. van Acker, K. Janovicek, A. De Laport et I. McDonald (2013). « Estimating sustainable crop residue removal rates and costs based on soil organic matter dynamics and rotational complexity », *Biomass and Bioenergy*, vol. 56, p. 607-618.

²⁹ Petrolia, D. R. (2008). « The economics of harvesting and transporting corn stover for conversion to fuel ethanol: A case study for Minnesota », *Biomass and Bioenergy*, vol. 32, p. 603-612.

³⁰ Yemshanov D., D. W. McKenney, S. Fraleigh, B. McConkey, T. Huffman et S. Smith (2014). « Cost estimates of post-harvest forest biomass supply for Canada », *Biomass and Bioenergy*, vol. 69, p. 80-94.

Définition de l'économie propre

Afin de rendre compte de l'évolution de l'économie propre, le modèle gTech détermine la proportion d'investissements, d'activités de production et d'emplois « propres » (c'est-à-dire liés à la distribution et à l'utilisation de technologies sobres en carbone). Constituent des investissements propres les investissements suivants :

- Tout investissement dans un secteur produisant de l'énergie ou des utilisations finales propres, dont la production d'électricité renouvelable, la fabrication de biocarburants, le transport en commun et l'approvisionnement en gaz naturel renouvelable. À noter que Statistique Canada ne considère pas le transport en commun comme un secteur propre.
- Tout investissement dans une technologie ou un processus facilitant la réduction des émissions. Valide pour tous les secteurs (p. ex., camions électriques dans le secteur du camionnage). L'acquisition de technologies propres par les ménages est considérée comme un investissement.

En plus de l'économie propre, gTech répertorie les investissements dans deux autres catégories, aux fins de comparaison :

- Reste du secteur énergétique (sources d'énergie polluantes, comme le gaz naturel et le charbon).
- Reste des secteurs économiques (autres secteurs, comme les assurances ou l'éducation).

3. Portrait d'un Canada carboneutre

Ce chapitre consacré aux facteurs d'atténuation présente les résultats des trajectoires nationales vers la carboneutralité jusqu'en 2050. La section 3.1 décrit les trajectoires dans l'ensemble de l'économie canadienne : les principaux facteurs de réduction des émissions, l'adoption de technologies et les investissements à l'échelle nationale. La section 3.2 comprend une description des principaux facteurs de réduction d'émissions et de l'évolution de la consommation énergétique des trajectoires par secteur.

3.1 Facteurs de réduction des émissions au Canada

Cette section porte sur les mesures, technologies et investissements névralgiques de réduction des émissions visant à décarboniser l'ensemble de l'économie canadienne.

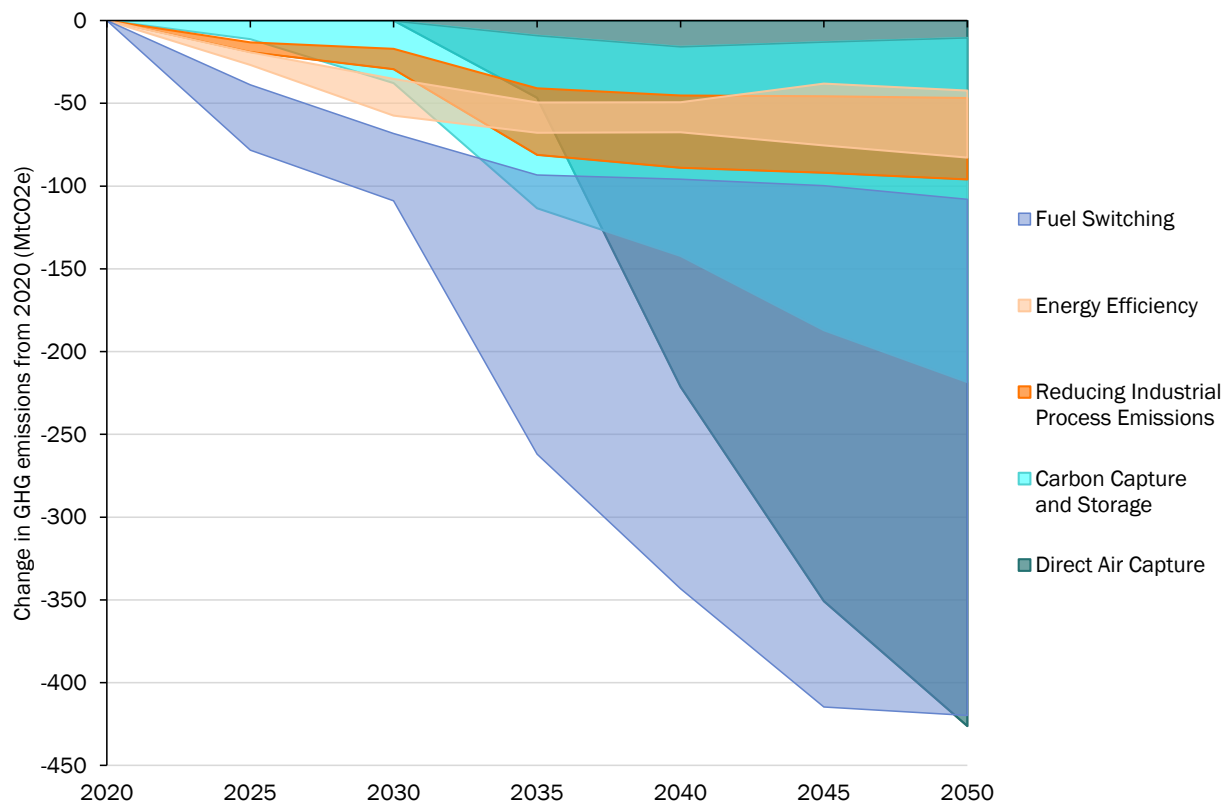
3.1.1 Principales mesures de réduction des émissions

Notre analyse a fait ressortir cinq grands facteurs de réductions d'émissions dans l'ensemble de l'économie canadienne. Figures 3 illustre l'évolution annuelle du niveau d'émissions au pays par rapport à celui de 2020 pour chacun de ces facteurs (p. ex., remplacement des combustibles ou gain d'efficacité énergétique).

Les fourchettes de valeurs des différents facteurs correspondent à la variation de l'importance de chaque mesure d'atténuation d'un scénario de carboneutralité à l'autre. Pour certains facteurs (CAD, CSC, remplacement des combustibles), cette importance varie beaucoup, tandis que pour d'autres (efficacité énergétique, décarbonisation industrielle) elle demeure assez constante. On remarque notamment une corrélation inverse entre l'utilisation de technologies à émissions négatives (CAD, CSC) et le remplacement des combustibles par des sources d'énergie propre. Ainsi, dans les scénarios qui supposent la viabilité de la CAD et de la CSC, il y a moins d'électrification et de remplacement de combustibles, et vice versa.

Nous précisons plus loin le rôle de chaque facteur dans l'atteinte de la carboneutralité.

Figures 3 : Facteurs de réduction des émissions dans l'économie du Canada



Efficacité énergétique

L'efficacité énergétique – les gains d'efficacité dans l'enveloppe, le chauffage et la climatisation des bâtiments et dans l'industrie, de même que l'utilisation des transports en commun – occupe une place importante dans tous les scénarios. Dans un contexte de carboneutralité, de 2020 à 2050, les réductions attribuables à l'efficacité énergétique seraient de l'ordre de 42 à 83 Mt. éq. CO₂. Ce facteur a un rôle prédominant dans les scénarios où le coût des énergies propres suit les projections du cas de référence et où les gains d'efficacité énergétique constituent une option économique, tandis qu'il est relégué au second plan dans les scénarios où les coûts des technologies propres diminuent plus rapidement que prévu.

Réduction des émissions issues de procédés industriels

Parmi les options de décarbonisation des procédés industriels, notons la réduction des émissions de méthane du secteur pétrolier et gazier, la réduction des émissions d'hydrofluorocarbones (HFC), et la transition vers des modes de production d'acier

plus sobres en carbone dans le secteur sidérurgique. Dans nos scénarios, l'optimisation des procédés industriels engendre une réduction d'émissions de 30 à 47 Mt éq. CO₂ de 2020 à 2050. La valeur basse suppose la disponibilité de technologies de CSC permettant la captation et le stockage des émissions issues de procédés industriels. À l'opposé, l'indisponibilité de la CSC force la réduction de ces émissions. Dans ces scénarios, la limitation des émissions de méthane dans le secteur gazier et pétrolier joue un rôle majeur, qui se traduit par une réduction allant jusqu'à 22 Mt éq. CO₂ en 2050. La transformation des modes de production de l'acier, qui recèle un potentiel de réduction de 9 à 23 Mt éq. CO₂ selon le scénario, constitue aussi l'un des principaux facteurs de réduction.

Technologies à émissions négatives

Certains scénarios supposent une commercialisation à grande échelle de la technologie de CAD, mais d'autres ne l'envisagent pas. Cette incertitude quant à l'avenir de la CAD en 2050 se reflète dans les différentes trajectoires carboneutres : certains scénarios supposent une captation nulle, d'autres une réduction allant jusqu'à 426 Mt éq. CO₂. Dans les scénarios supposant la disponibilité de la CAD, cette dernière joue un rôle majeur pour l'atteinte de la carboneutralité (réduction d'émissions de 307 à 426 Mt éq. CO₂ en 2050). La réduction la plus importante se produit dans des scénarios où le reste du monde instaure des politiques climatiques en parallèle avec le Canada : l'expérience cumulative avec des technologies propres comme la CAD accélère la baisse de leur coût. La CAD occupe également le premier plan lorsque le coût d'autres technologies propres – combustible hydrogène, véhicules électriques à batterie, véhicules à hydrogène, notamment – suit la courbe de prix du scénario de référence, auquel cas la technologie de CAD constitue la mesure de réduction la plus rentable. La valeur basse correspond aux scénarios où le Canada devance les autres pays dans la mise en œuvre de sa politique climatique et où les autres technologies propres suivent une trajectoire de bas prix.

La CSC est un autre facteur de réduction de GES qui varie grandement selon le scénario. Comme pour la CAD, cette variation est largement attribuable à la structure du scénario; certains supposent que la rentabilité et la fiabilité de la CSC seront insuffisantes pour permettre l'élimination à grande échelle des émissions dues à la combustion. Dans ces scénarios, la CSC sert à réduire les émissions de sources sans combustion (émissions de procédés associés à la production d'hydrogène, de ciment et d'engrais) et engendre une réduction des émissions allant de 10 à 27 Mt éq. CO₂ de 2020 à 2050. Dans les scénarios qui supposent la disponibilité de ce facteur de réduction pour les émissions causées par la combustion, la réduction qu'il engendre peut atteindre 218 Mt éq. CO₂ en 2050. La valeur haute correspond aux scénarios où la CAD n'est pas disponible. Lorsque CAD et CSC sont disponibles, la CSC permet la captation d'environ 100 Mt éq. CO₂ des émissions en 2050.

L'adoption de ces technologies se produit surtout en Alberta et en Saskatchewan, mais aussi en Colombie-Britannique, qui a déjà un grand potentiel de stockage géologique du carbone.

Remplacement des combustibles

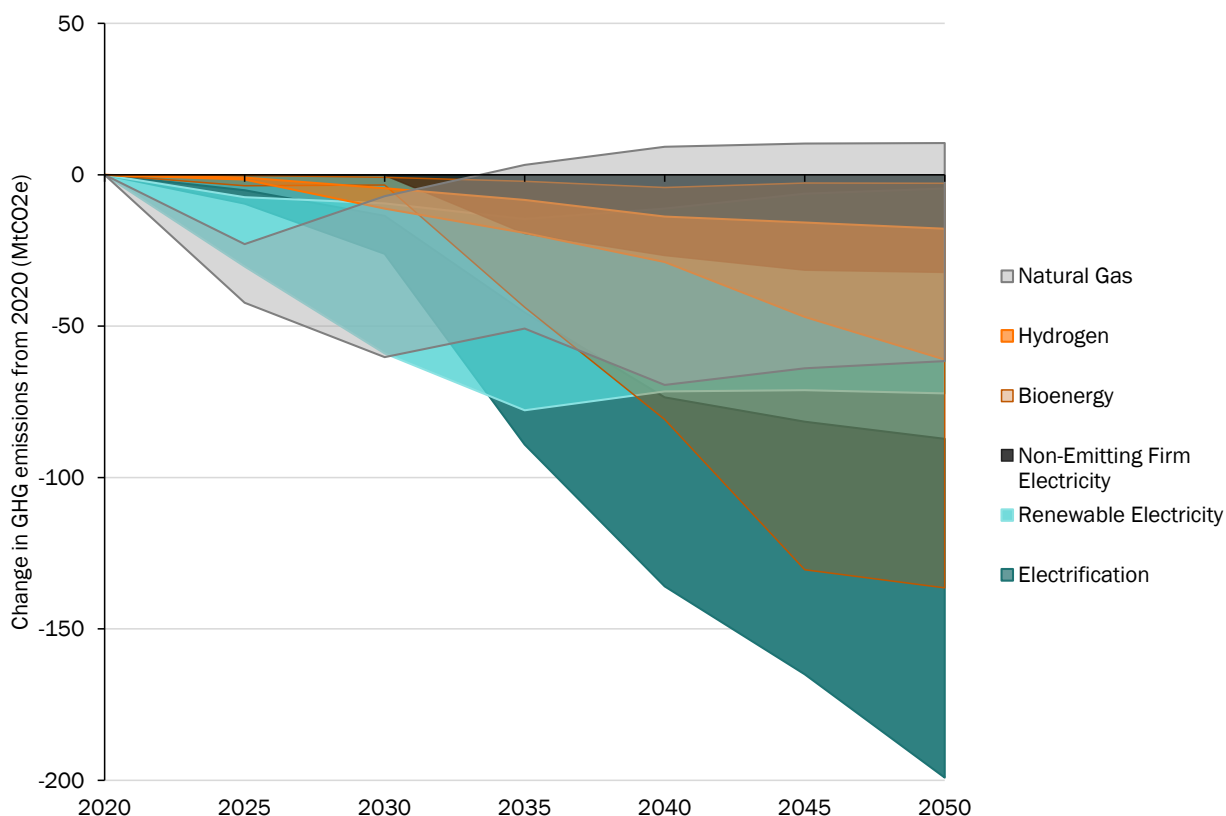
Le remplacement des combustibles, c'est l'utilisation de combustibles propres (électricité, hydrogène ou biocarburants) en transport, l'ajout de gaz naturel renouvelable (GNR) ou d'hydrogène pour diminuer l'intensité en émissions du gaz naturel, ou la substitution de combustibles fossiles polluants comme le pétrole par du gaz naturel. Son poids dans la réduction des émissions varie d'une trajectoire à l'autre.

Cette mesure d'atténuation s'avère toutefois essentielle, tous scénarios de carboneutralité confondus. De 2020 à 2050, elle engendrerait une réduction d'au moins 108 Mt éq. CO₂. Cette valeur basse correspond à des scénarios qui supposent la disponibilité de la CAD et de la CSC, technologies qui permettent de compenser l'utilisation de combustibles polluants, ainsi que l'adoption de politiques climatiques par d'autres pays en même temps que le Canada, ces deux phénomènes entraînant une augmentation de la demande de biocarburants aux États-Unis.

Dans la plupart des scénarios, le remplacement des combustibles engendre une réduction des émissions beaucoup plus marquée d'ici 2050 : jusqu'à 420 Mt éq. CO₂. Ce plafond correspond aux scénarios où CSC et CAD ne sont pas disponibles et où le remplacement des combustibles devient le principal facteur de réduction des émissions. Dans cette éventualité, le remplacement des combustibles prédomine dans les scénarios où le coût de technologies propres (véhicules électriques, combustible hydrogène et véhicules à hydrogène) baisse graduellement, et où de nouvelles sources stables de production d'électricité propre sont offertes à bas prix, ce qui réduit les tarifs d'électricité.

Figure 4 présente la contribution de chaque combustible de remplacement à la réduction des émissions. Notons que dans cette figure, l'électricité renouvelable correspond à l'utilisation d'énergie renouvelable (p. ex., éolienne, solaire) pour générer de l'électricité, tandis que l'électrification correspond au remplacement de combustibles par de l'électricité. Ainsi, l'ampleur de ces deux mesures de réduction est étroitement liée, mais elles ne comptabilisent pas en double les réductions de GES.

Figure 4 : Réduction des émissions attribuable au remplacement des combustibles dans l'ensemble de l'économie canadienne



Parmi ces combustibles, les biocarburants et les GNR engendrent une réduction d'émissions de 4 à 127 Mt éq. CO₂ en 2050. L'utilisation de bioénergie est moindre dans les scénarios qui supposent la disponibilité des CAD et des CSC et l'indisponibilité des biocarburants de deuxième génération. Elle atteint un pic dans les scénarios où CAD et CSC ne sont pas disponibles et où le Canada met en œuvre sa politique climatique avant les autres pays, ce qui entraîne une demande en biocarburants inférieure aux États-Unis.

L'électrification est un facteur important de réduction des émissions dans tous les scénarios, allant de 87 à 199 Mt éq. CO₂ de 2020 à 2050. Comme pour la bioénergie, il y a moins d'électrification dans les scénarios qui supposent la disponibilité des CAD et des CDC, particulièrement dans ceux où les autres grands pays mettent en œuvre des mesures climatiques au même rythme que le Canada, ce qui provoque une baisse de coût plus rapide de ces technologies.

Le virage vers le combustible hydrogène réduirait de 18 à 61 Mt éq. CO₂ les réductions d'émissions en 2050. La valeur basse correspond aux scénarios où la CAD et la CSC sont disponibles et où le prix des véhicules électriques baisse plus rapidement que

prévu, contrairement à celui des véhicules à hydrogène. Le point le plus haut de la fourchette correspond à des scénarios où ni la CAD, ni la CSC, ni les biocarburants de deuxième génération ne sont disponibles, et où on présume qu'il y a un taux d'hydrogène supérieur dans le flux de gaz naturel.

3.1.2 Adoption de technologies propres

L'ensemble des trajectoires vers la carboneutralité supposent un essor des technologies et des combustibles propres. L'adoption de technologies propres entraîne des réductions d'émissions engendrées par l'élimination des combustibles fossiles et des pertes d'efficacité, et, parfois, la captation et le stockage des émissions restantes. Le Tableau 7 présente le degré d'adoption des principales technologies.

L'adoption accrue de quelques grandes technologies est une constante de tous les scénarios. La proportion de véhicules électriques augmente dans toutes les trajectoires, comme la production d'électricité renouvelable, à mesure que le secteur de l'électricité délaisse les centrales thermiques au profit d'une énergie propre. Pour l'adoption d'autres technologies, notamment les technologies à émissions négatives, l'avenir est plus incertain. La disponibilité de la CAD et de la CSC a une grande influence sur la façon dont le Canada atteindra son objectif de 2050. Les résultats de ces technologies sont donc très susceptibles de faire dévier la trajectoire empruntée par le Canada.

La technologie de CAD retire le dioxyde de carbone directement de l'atmosphère et expulse du dioxyde de carbone pur sous forme compressée, stockable dans le sol ou réutilisable. Quant aux technologies de stockage de CSC, elles captent les émissions de dioxyde de carbone (provenant de la combustion ou de procédés industriels) avant leur entrée dans l'atmosphère. La CSC peut servir à diminuer l'intensité des émissions de la production d'énergie et des installations industrielles (centrales électriques, usines de valorisation du bitume, raffineries de pétrole et usines de production d'acier, de ciment et d'engrais). Le dioxyde de carbone ainsi capté est ensuite enfoui sous terre dans des formations géologiques qui s'y prêtent, comme celles de l'Ouest canadien, où l'on trouve des roches poreuses profondes recouvertes par une couverture rocheuse solide prévenant les fuites. Une utilisation accrue de cette technologie dans la trajectoire du Canada vers la carboneutralité pourrait donc générer des possibilités économiques intéressantes dans ces régions en raison de leur capacité de stockage importante. Notons que d'autres endroits au pays dont la capacité n'a pas encore été analysée ou caractérisée présenter aussi une capacité de stockage géologique intéressante.

Lorsqu'elle est disponible, la CAD est adoptée à très grande échelle (jusqu'à 426 Mt éq. CO₂ en 2050), principalement en Alberta et en Saskatchewan en raison de la proximité du réservoir de carbone potentiel. La CSC, lorsqu'elle est disponible, est également adoptée à très grande échelle (jusqu'à 218 Mt éq. CO₂ en 2050). Dans les scénarios où ni la CAD ni la CSC ne sont disponibles, l'adoption d'autres technologies propres (biocarburants, électricité renouvelable et véhicules électriques) est nettement plus importante. Dans ces scénarios, le degré d'adoption de véhicules à hydrogène dépend de l'évolution du coût de ces technologies ainsi que de la disponibilité des biocarburants de deuxième génération. L'adoption de biocarburants et de GNR est à son plus bas lorsque le coût des véhicules électriques et des véhicules à hydrogène diminue plus vite que prévu.

Tableau 7 : Degré d'adoption des principales technologies toutes trajectoires confondues

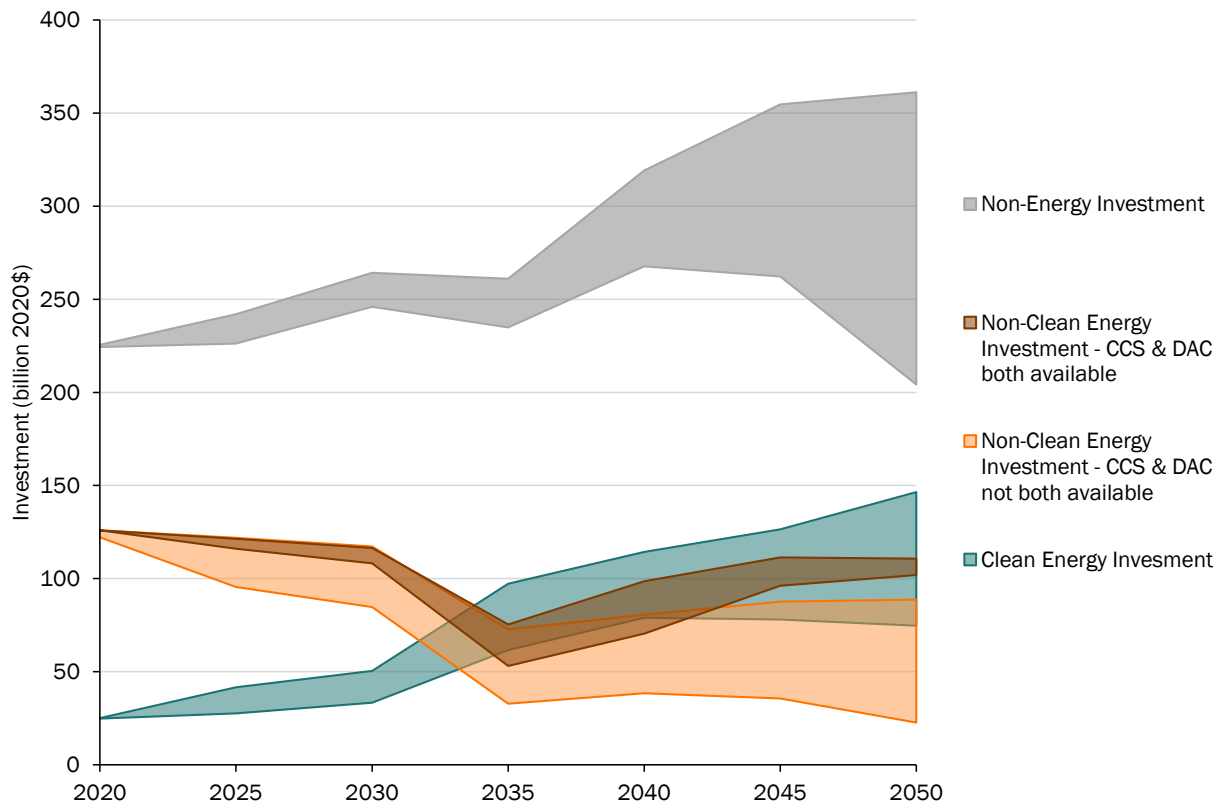
Technologie propre	2020	2030	2040	2050
Captation atmosphérique directe (Mt éq. CO ₂)	0-0	0-0	0-221	0-426
Captation et stockage de dioxyde de carbone (Mt éq. CO ₂)	0-0	0-38	16-142	10-218
Biocarburants et gaz naturel renouvelable (PJ)	165-166	224-252	338-1252	321-2153
Électricité renouvelable (TWh)	395-396	439-536	592-674	606-746
Véhicules électriques (% de nouvelles parts de marché)				
Véhicules personnels	3-4	9-14	56-89	58-100
Véhicules mi-lourds et lourds	0-0	3-4	8-12	7-32
Véhicules à pile à combustible hydrogène (% de nouvelles parts de marché)				
Véhicules personnels	0-0	0-0	0-0	0-0.3
Véhicules mi-lourds et lourds	0-0	6-14	30-51	37-72

3.1.3 Investissements dans les technologies propres

Les facteurs de réduction des émissions d'un océan à l'autre sont soutenus par une transition des investissements, qui délaisse les énergies polluantes comme les combustibles fossiles pour se tourner vers des technologies propres comme l'électricité renouvelable, la fabrication de biocarburants et les véhicules électriques (Figure 5). Ainsi, les investissements dans les énergies polluantes diminuent, passant de 126 milliards de dollars en 2020 à 23 à 111 milliards de dollars (selon le scénario) en 2050. Les investissements sont minimaux dans les énergies propres et atteignent un pic dans les énergies polluantes lorsque la CAD et la CSC permettent de diminuer les émissions associées au maintien de la consommation combustible fossile. Lorsque la CAD et la CSC ne sont pas disponibles, on remarque une transition marquée des investissements dans les énergies polluantes vers des sources d'énergie propres,

comme le montre la figure 5. Peu importe la technologie de réduction des GES utilisée, les investissements demeurent beaucoup plus importants hors du secteur de l'énergie que dans ce secteur.

Figure 5 : Investissements annuels toutes trajectoires confondues



Les investissements dans les énergies propres concernent notamment les combustibles et les technologies propres. Figure 6 présente leur évolution pour les combustibles propres dans l'ensemble des trajectoires, tandis que la Figure 7 présente la même évolution pour les technologies propres. L'ampleur des investissements dans ces combustibles et technologies varie selon la trajectoire. Dans les scénarios où la CAD et la CSC sont disponibles, on remarque notamment un investissement massif dans ces technologies plutôt que dans la production d'électricité et de biocarburants. On remarque aussi d'importants investissements dans les véhicules électriques, tous scénarios confondus, qui sont plus substantiels lorsque la CAD et les biocarburants de deuxième génération ne sont pas disponibles. Ils sont également plus substantiels lorsque la production d'électricité propre est abordable, car une électricité à bas prix rend le passage à l'électrique plus économique. Lorsque la CAD et la CSC sont disponibles, les autres méthodes de

décarbonisation sont quelque peu délaissées au profit de ces solutions, utilisées pour compenser les émissions dans toute l'économie.

Figure 6 : Investissements dans les combustibles propres toutes trajectoires confondues

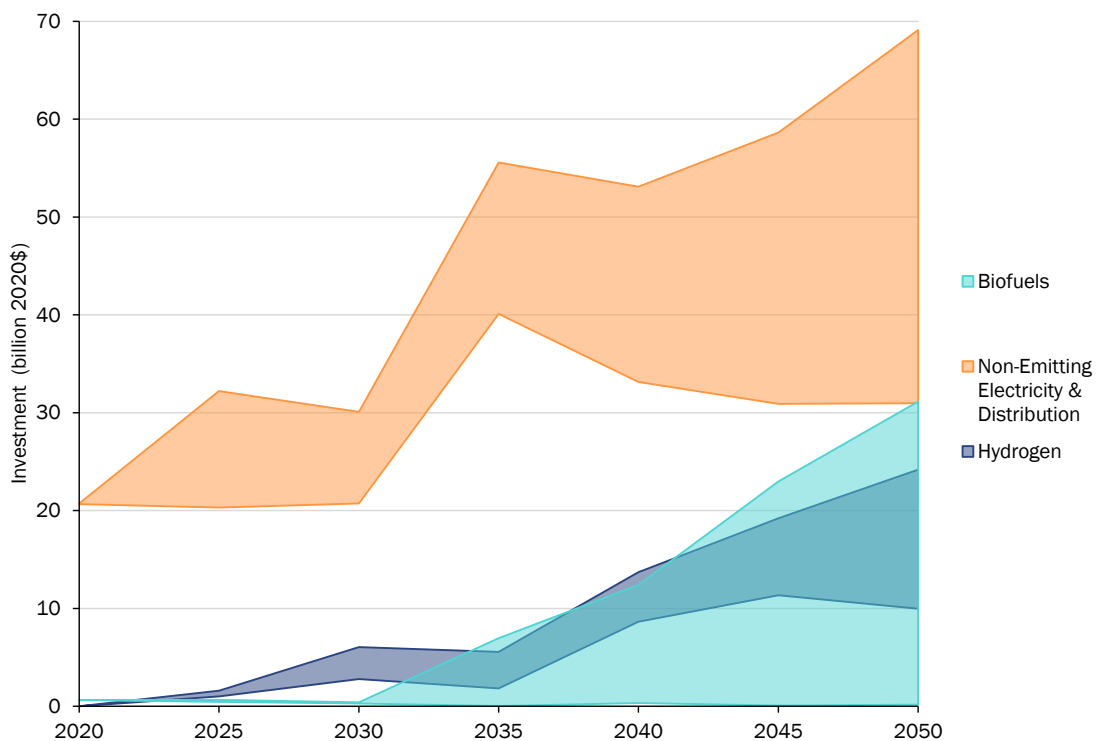
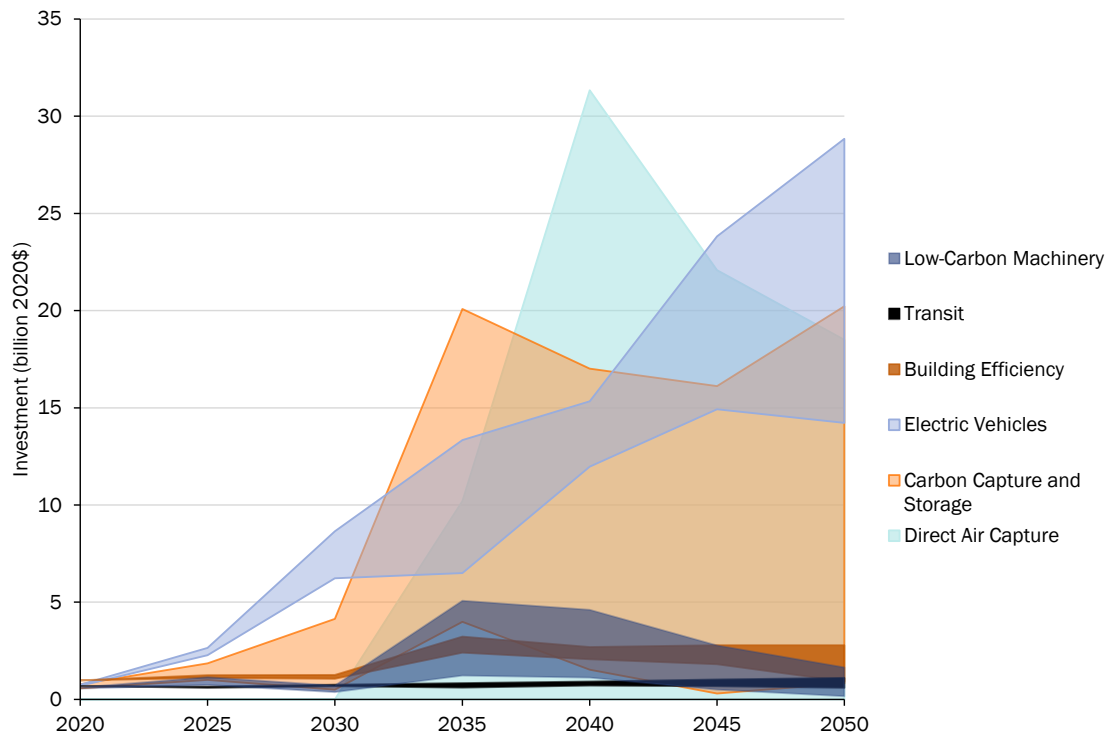


Figure 7 : Investissements dans les technologies propres toutes trajectoires confondues



3.2 Facteurs de réduction des émissions dans des secteurs névralgiques

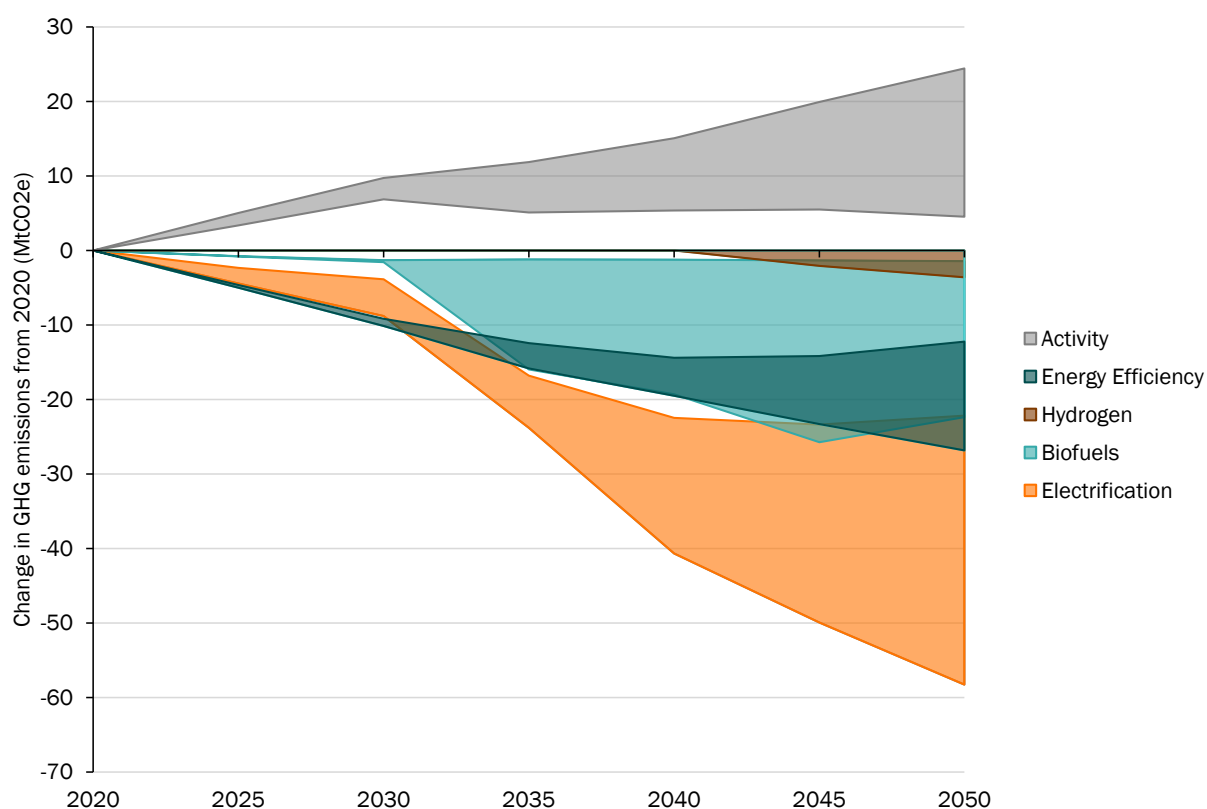
Cette section traite des principaux facteurs de réduction des émissions et présente les changements dans la consommation d'énergie par secteur.

3.2.1 Immobilier

Dans toutes les trajectoires vers la carboneutralité, la croissance de la construction résidentielle et commerciale suit le rythme de la croissance économique et démographique. L'intensification des activités du secteur immobilier entraîne une augmentation des émissions, représentée par la portion grise de la figure 8. Ces émissions accrues sont toutefois simultanément compensées par les gains d'efficacité énergétique, l'électrification des systèmes de chauffage (par l'utilisation de thermopompes) et le remplacement du gaz naturel par des biocarburants ou de l'hydrogène. Les facteurs de réduction des émissions du secteur immobilier résidentiel et commercial sont présentés dans la Figure 88.

L'électrification, le facteur d'atténuation par excellence de ce secteur, entraîne une réduction d'émissions de 22 à 58 Mt éq. CO₂ en 2050 par rapport à 2020. La valeur supérieure correspond à des scénarios où la CAD n'est pas disponible, ce qui entraîne la décarbonisation entière de tout le secteur de l'immobilier; il en va de même dans les scénarios où les biocarburants de deuxième génération ne sont pas disponibles. Lorsqu'ils le sont, ils représentent eux aussi un facteur de réduction efficace : jusqu'à 22 Mt éq. CO₂. Ils sont davantage mis à profit dans les scénarios où le Canada devance les autres pays dans la lutte contre les changements climatiques et n'entre pas en concurrence avec la demande de biocarburants aux États-Unis (importation accrue de bioénergie des États-Unis), ainsi que dans ceux où la CAD ne peut pas compenser les émissions, car il faut procéder à davantage de remplacement de combustibles. L'efficacité énergétique, avec un potentiel de réduction de 12 à 27 Mt éq. CO₂ en 2050, est le troisième facteur de réduction en importance dans ce secteur.

Figure 8 : Facteurs de réduction des émissions du secteur immobilier résidentiel et commercial



Le bilan de la consommation énergétique du secteur immobilier s'améliore, toutes trajectoires confondues : de 2020 à 2050, on constate une diminution de 16 à 44 %

(Figure 99). Les réductions d'émissions sont entraînées par une transition dans l'utilisation des combustibles, passant du gaz naturel à des énergies plus propres, dont l'électricité et la bioénergie (GNR), en parallèle avec une diminution de la consommation énergétique. L'évolution de la consommation énergétique par combustible est présentée à la Figure 10. La consommation de gaz naturel baisse dans toutes les trajectoires, mais demeure plus élevée dans les scénarios où la CAD est disponible. Dans ces derniers, le gaz naturel est utilisé dans les portions les plus difficiles à décarboniser du parc immobilier (vieux bâtiments où le remplacement des combustibles est plus coûteux). Dans les scénarios où la CAD n'est pas possible, le remplacement des combustibles par de l'électricité et des GNR joue un rôle de premier plan.

Figure 9 : Bilan de la consommation énergétique dans le secteur immobilier résidentiel et commercial

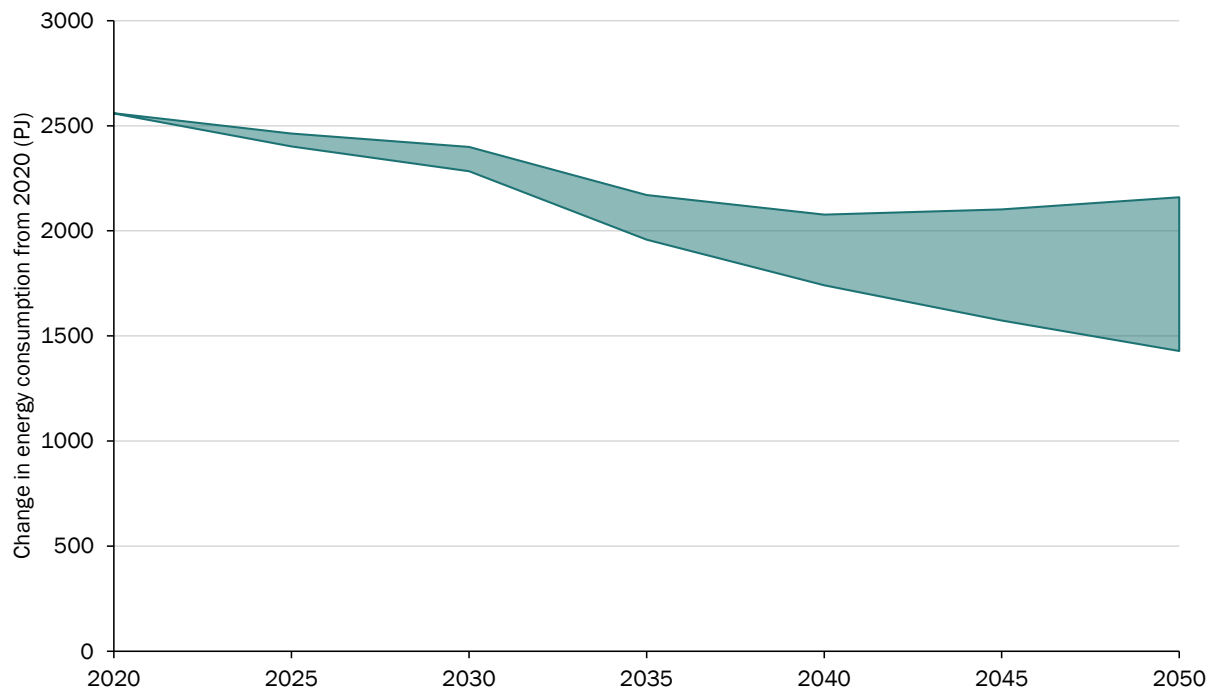
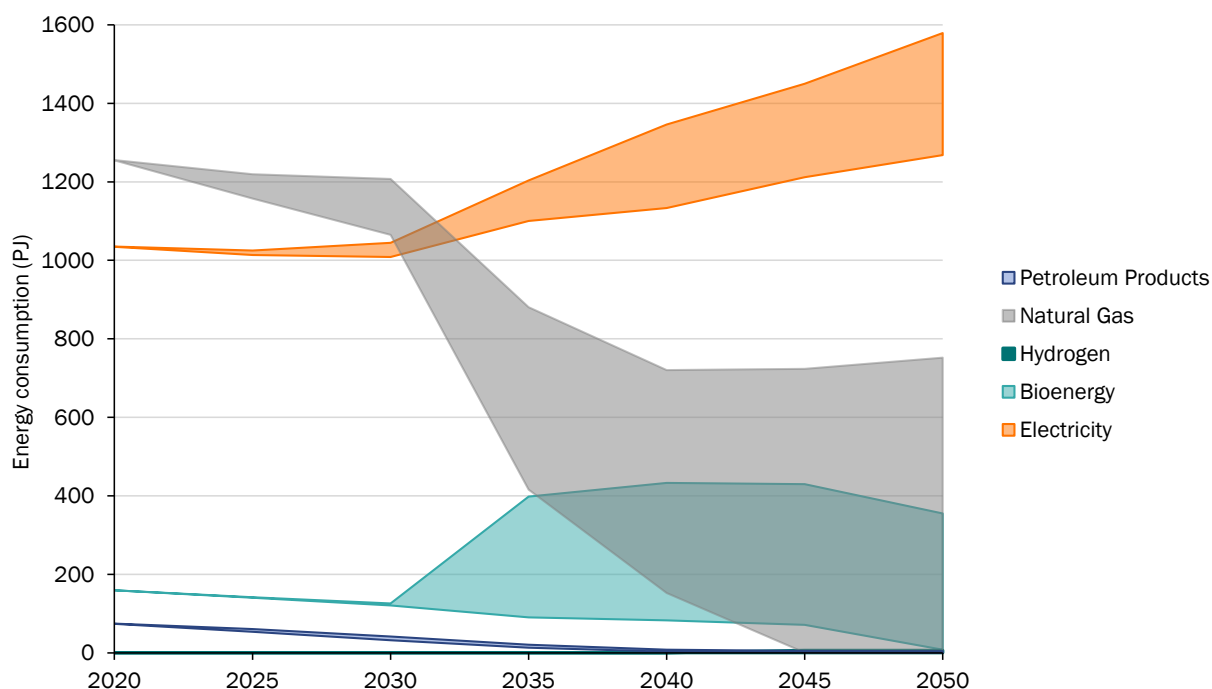


Figure 10 : Consommation énergétique par type de combustible dans le secteur immobilier résidentiel et commercial



3.2.2 Transport

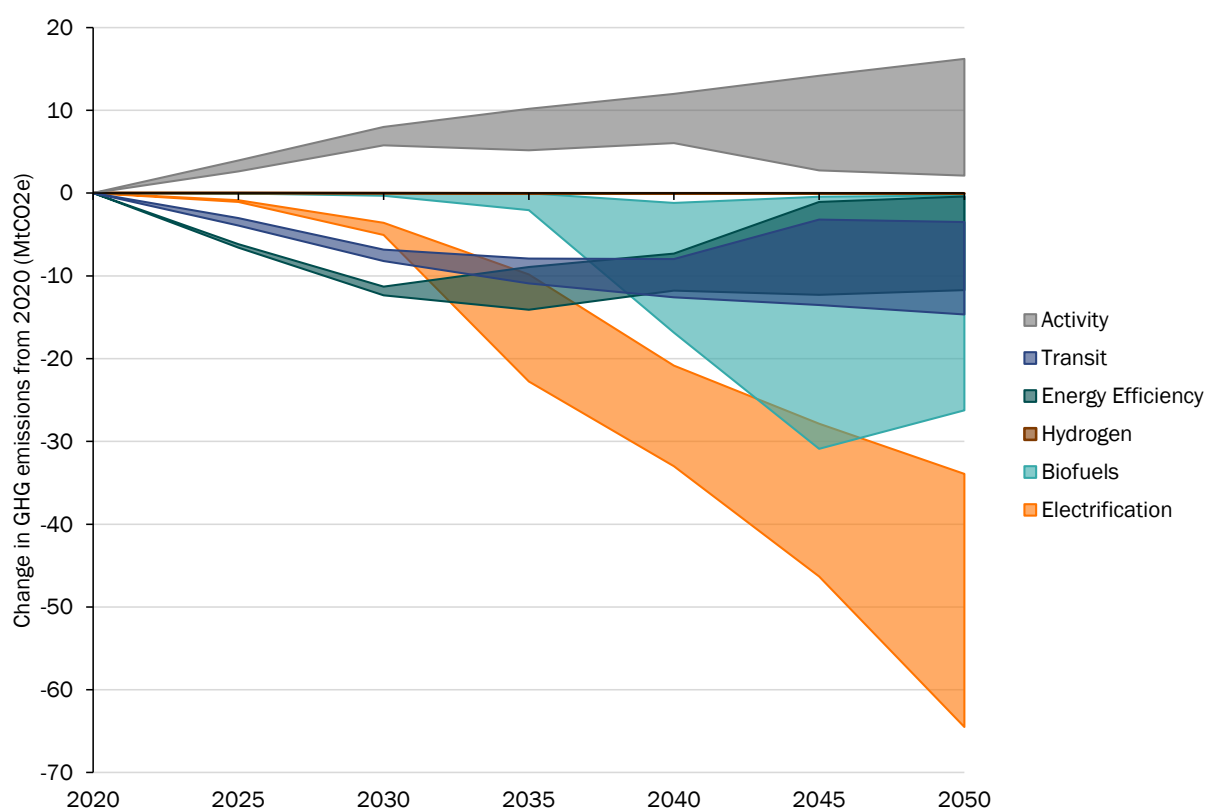
Transport des personnes

Le nombre de voitures-kilomètres parcourus augmente au rythme de la croissance démographique et économique toutes trajectoires confondues. Dans ce secteur, cette augmentation va de pair avec une diminution marquée des émissions, largement attribuable au virage électrique et aux gains d'efficacité des véhicules. La figure 11.11 présente l'ensemble des facteurs de réduction de ce secteur.

L'électrification, facteur d'atténuation par excellence de ce secteur, entraîne une réduction d'émissions de 34 à 65 Mt éq. CO₂ en 2050, soit plus de la moitié des réductions, toutes trajectoires confondues. La valeur supérieure correspond à des trajectoires où ni la CAD ni les biocarburants de deuxième génération ne sont disponibles, et où le coût des véhicules électriques baisse plus rapidement que prévu. Dans les scénarios prévoyant leur disponibilité, les biocarburants sont un autre important facteur de réduction de ce secteur (jusqu'à 26 Mt éq. CO₂ en 2050). Cette tendance est plus marquée dans les scénarios où le Canada devance les autres pays dans la mise en œuvre de sa politique climatique, car la concurrence pour les biocarburants aux États-Unis y est moins féroce, ainsi que dans les scénarios où les

CSC ne sont pas disponibles, car ces scénarios impliquent également moins de concurrence pour les BECSC (bioénergie avec CSC). L'efficacité énergétique est un autre facteur de réduction dans certains scénarios (jusqu'à 12 Mt éq. CO₂ en 2050), ainsi que l'abandon de la voiture individuelle au profit du transport en commun (de 3,5 à 15 Mt éq. CO₂ en 2050). L'hydrogène ne contribue pas de manière significative à la réduction des émissions de véhicules de passagers dans les scénarios carboneutres analysés ici, mais occupe un rôle de premier plan dans celle des véhicules mi-lourds et lourds dont il sera question plus loin.

Figure 11 : Facteurs de réduction des émissions des véhicules personnels



Le bilan de la consommation énergétique du secteur du transport des personnes s'améliore, toutes trajectoires confondues : d'ici 2050, on prévoit une diminution de 56 à 79 % (Figure 1212). La Figure 1313 illustre l'évolution de la consommation d'énergie par type de carburant dans ce secteur. Tous les scénarios montrent une réduction marquée de la consommation de produits du pétrole par les moteurs à combustion interne et une augmentation du nombre de véhicules électriques à batterie. Les scénarios où la consommation d'électricité de ce secteur atteint un pic sont ceux où la CAD n'est pas disponible, le coût des véhicules électriques baisse plus rapidement que prévu et de nouvelles sources stables de production d'électricité

propre, offertes à bas prix, entraînent une baisse des tarifs d'électricité. Notons qu'en raison de l'efficacité accrue des véhicules électriques, l'énergie nécessaire pour faire fonctionner des véhicules électriques est moindre que pour le même nombre de véhicules à essence. La consommation de bioénergie connaît également une hausse dans ce secteur, surtout lorsque la CAD n'est pas disponible et que les États-Unis n'adoptent pas de politique climatique, ce qui provoque une diminution de la demande en bioénergie dans ce pays (possibilité d'importer davantage de bioénergie des États-Unis).

Figure 12 : Bilan de la consommation énergétique du transport des personnes

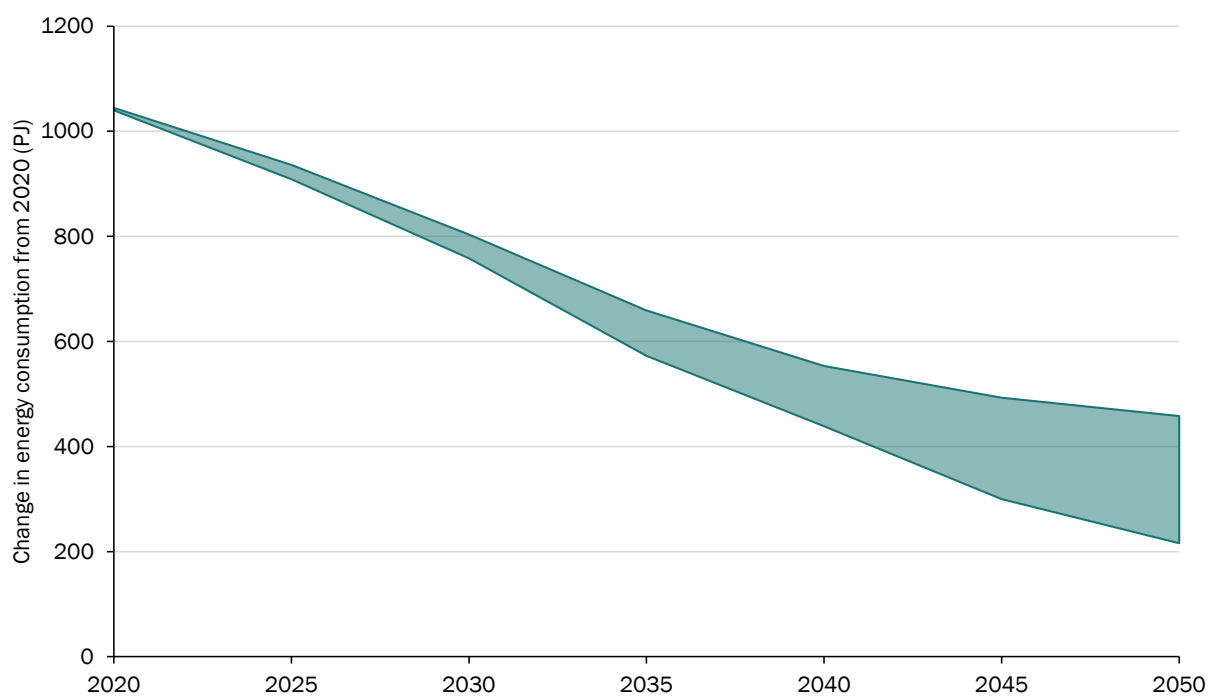
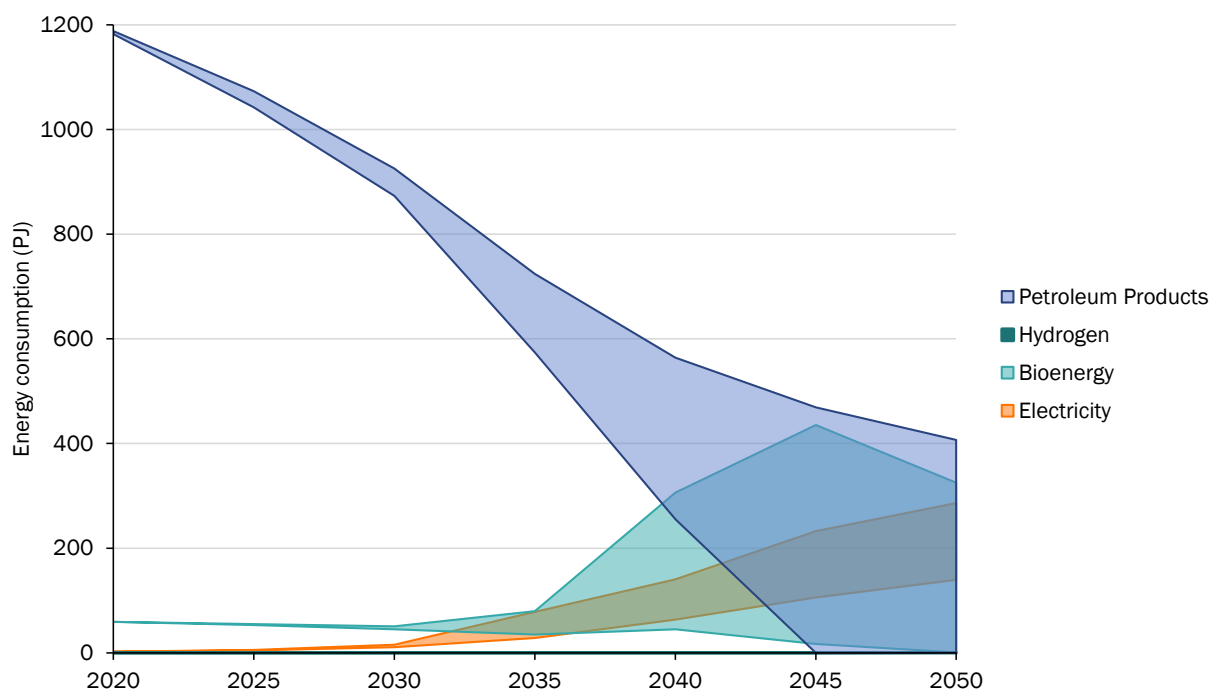


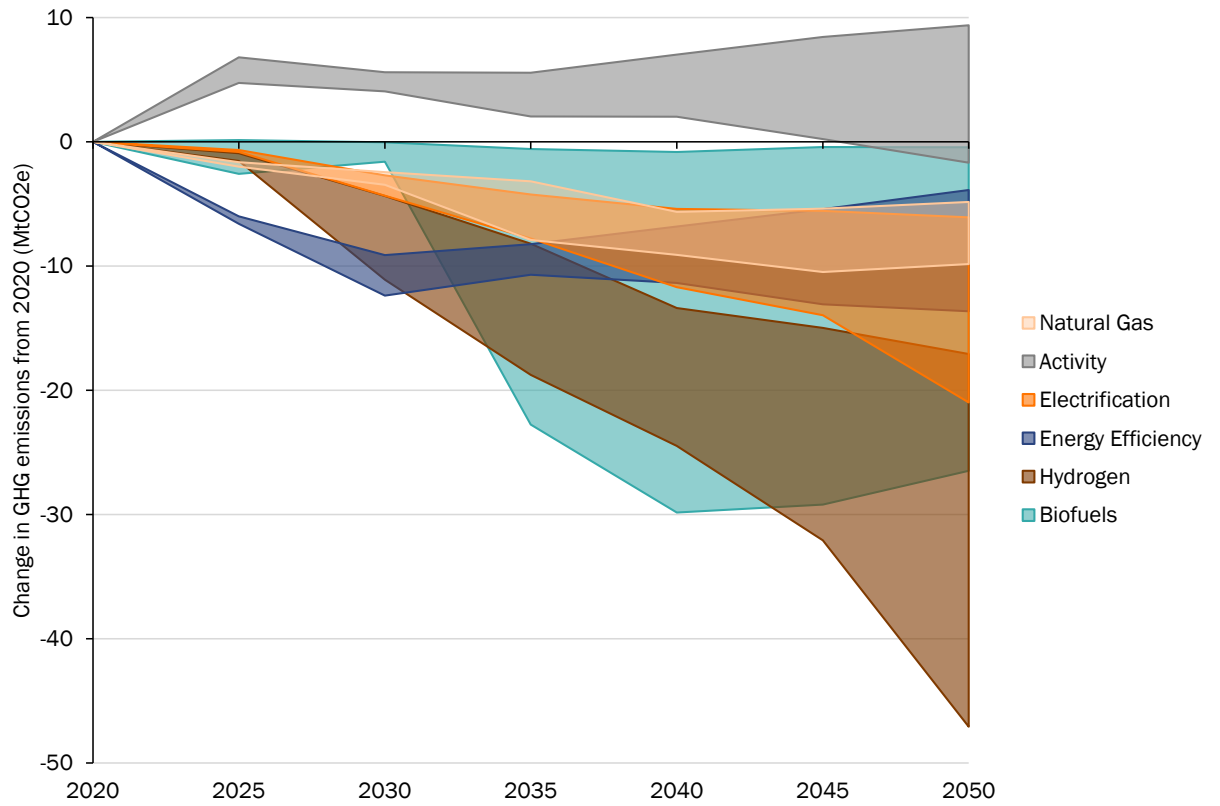
Figure 13 : Consommation énergétique du transport des personnes par type de carburant



Transport mi-lourd et lourd

Dans le secteur du transport mi-lourd et lourd, la complexité de l'électrification du transport de longue distance par camion lourd fait en sorte que celle-ci cède le pas à la bioénergie et à l'hydrogène (Figure 1414). D'ici 2050, le recours à la bioénergie entraîne une réduction des émissions pouvant atteindre 26,5 Mt éq. CO₂ et l'hydrogène, une réduction de 17 à 47 Mt éq. CO₂ dans ce secteur. Comme dans les secteurs de l'immobilier et du transport des personnes, les biocarburants entraînent davantage de réductions d'émissions dans les scénarios où le Canada devance les autres pays dans la mise en œuvre de sa politique climatique, car la concurrence avec les États-Unis pour les biocarburants y est moins féroce. Lorsque la CAD est disponible, la bioénergie est reléguée au second plan dans ce secteur, car la compensation par CAD devient plus rentable. Dans les scénarios où la CAD n'est pas disponible et où le coût des véhicules à hydrogène baisse plus rapidement que prévu, c'est l'hydrogène qui devient le premier facteur de réduction d'ici 2050.

Figure 14 : Facteurs de réduction des émissions des véhicules mi-lourds et lourds



Le bilan de la consommation énergétique de ce secteur s'améliore dans la plupart des trajectoires carboneutres (diminution allant jusqu'à 25 % de 2020 à 2050), mais demeure relativement constant ou s'alourdit (augmentation allant jusqu'à 2 % de 2020 à 2050) dans d'autres trajectoires (Figure 1515). Dans ces dernières, la consommation d'énergie commence à augmenter en 2035, avec la disponibilité de la CAD, qui permet d'éviter l'application de mesures d'atténuation des GES coûteuses. Les variations de consommation d'énergie sont ventilées par carburant à la Figure 1616, qui met de l'avant l'importance du remplacement des carburants dans la décarbonisation du transport mi-lourd et lourd, à mesure que ce secteur délaisse l'essence et le diesel. Dans les scénarios où la CAD est disponible, ce secteur continue de dépendre des produits du pétrole jusqu'en 2050, mais dans une moindre mesure. Lorsque la CAD n'est pas disponible, l'essence et le diesel sont complètement évacués d'ici 2040 à 2045.

Figure 15 : Bilan de la consommation énergétique du transport lourd et mi-lourd

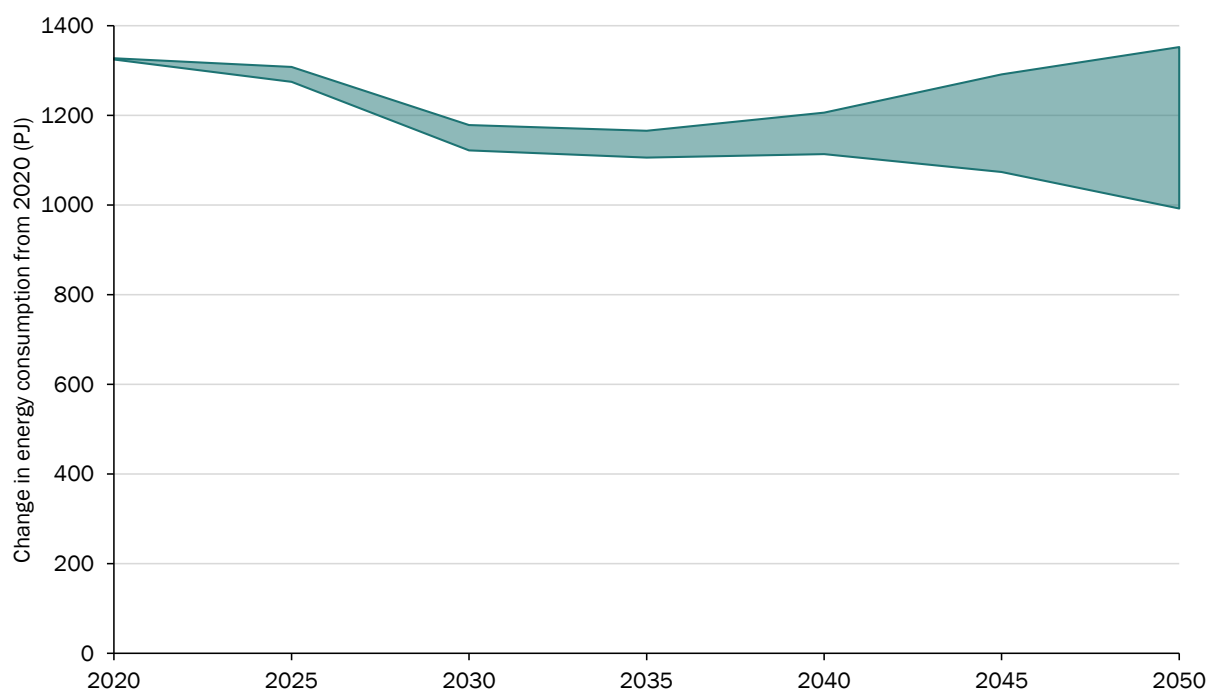
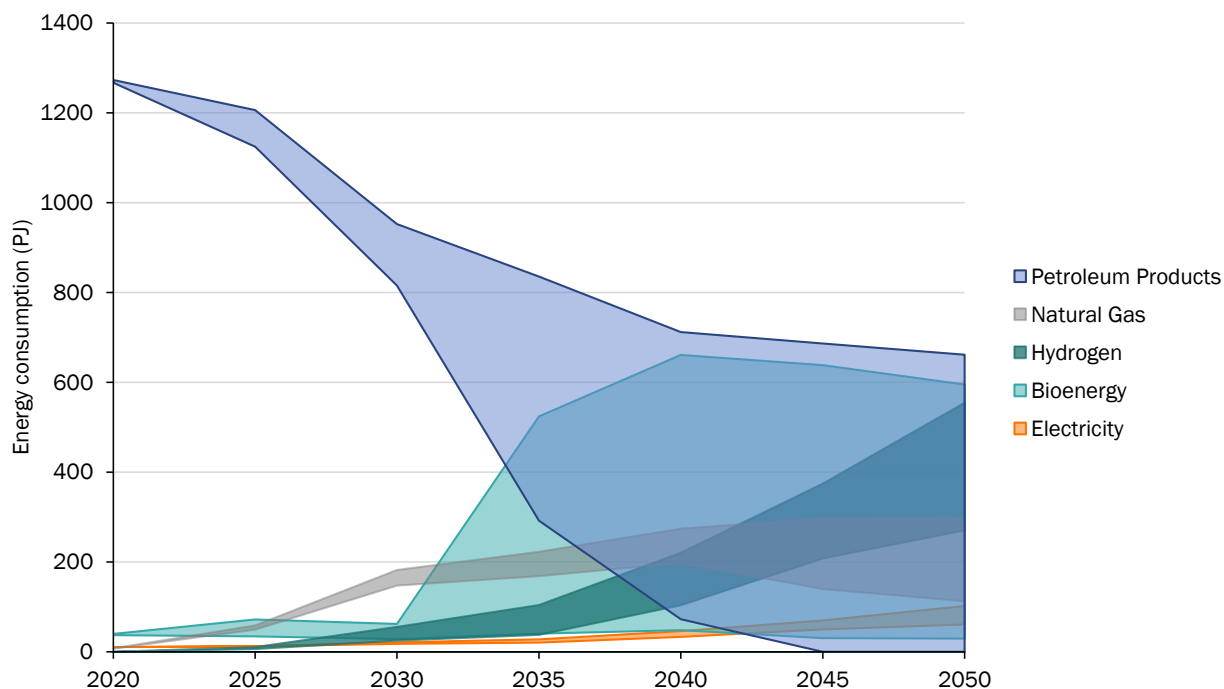


Figure 16 : Consommation d'énergie des véhicules mi-lourds et lourds par type de carburant



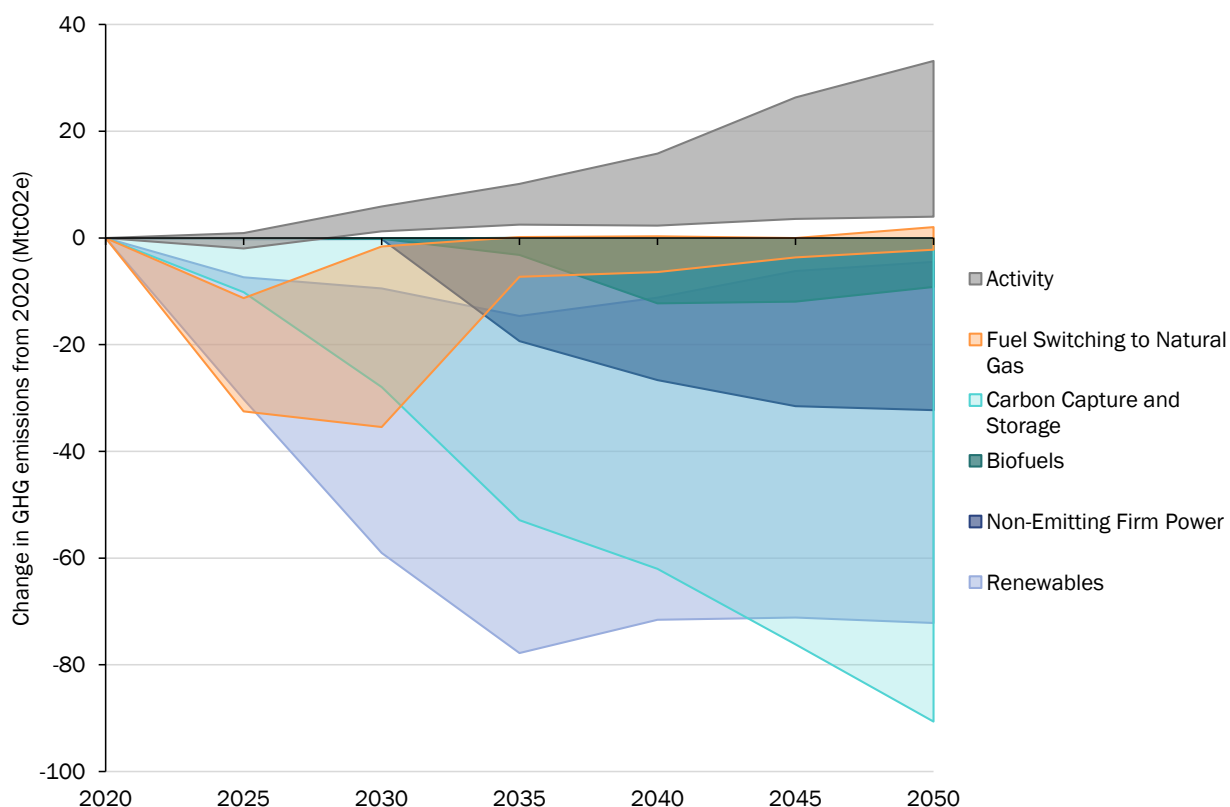
3.2.3 Électricité

La production d'électricité augmente de manière significative, toutes trajectoires confondues, au rythme de la demande croissante engendrée par les technologies propres (véhicules électriques, thermopompes, CAD si disponible et production d'hydrogène par électrolyse). Tous les scénarios indiquent une baisse de production d'électricité provenant de centrales thermiques et une hausse marquée de la production renouvelable. La Figure 1717 présente les facteurs de réduction des émissions dans le secteur de l'électricité.

Les scénarios où la CAD n'est pas disponible prévoient la décarbonisation entière de ce secteur. Dans ces trajectoires, les réductions sont entraînées par une augmentation de la production d'électricité renouvelable, comme l'énergie éolienne (de 4,5 à 72 Mt éq. CO₂ en 2050). La valeur maximale de la fourchette correspond à des scénarios où la CSC n'est pas disponible et où les énergies renouvelables deviennent le principal facteur d'atténuation du secteur. Lorsque la CSC est disponible, elle est l'un des principaux facteurs d'atténuation et entraîne une réduction des émissions allant jusqu'à 91 Mt éq. CO₂ en 2050. Si la CSC n'est pas disponible, mais que de nouvelles sources d'électricité propre (nucléaire, géothermie) sont disponibles et abordables, ces dernières deviennent un important facteur de réduction d'ici 2050. Le remplacement par le gaz naturel de combustibles fossiles

polluants (comme le charbon) se traduit par d'importantes réductions d'émissions dans certains scénarios (de 11 à 32,5 Mt éq. CO₂), mais seulement à court terme.

Figure 17 : Facteurs de réduction des émissions dans le secteur de l'électricité



Le bilan de la consommation énergétique du secteur de l'électricité varie grandement d'un scénario à l'autre : certains d'entre eux prévoient une augmentation de 72 % de 2020 à 2050, tandis que d'autres prévoient une diminution équivalente (Figure 1818). La consommation d'énergie de ce secteur atteint un pic dans les scénarios prévoyant la disponibilité de la CAD à partir de 2035, car cette solution consomme de l'électricité. La figure Figure 1919 présente l'évolution de la consommation d'énergie des centrales thermiques, par combustible. Tous les scénarios prévoient une baisse de la consommation de gaz naturel jusqu'à 2035. À ce moment, certains scénarios supposent la disponibilité de la CAD et l'augmentation subséquente de la consommation de gaz naturel jusqu'en 2050. Dans les scénarios où ni la CAD ni la CSC ne sont disponibles, il n'y a pas de production d'électricité à partir de gaz naturel jusqu'en 2045. On prévoit une réduction de la consommation d'énergie des centrales thermiques et leur remplacement par des sources d'électricité renouvelables (éolien, solaire), ainsi que par des sources stables d'électricité propre dans certains scénarios.

Figure 18 : Bilan de la consommation énergétique des centrales thermiques³¹

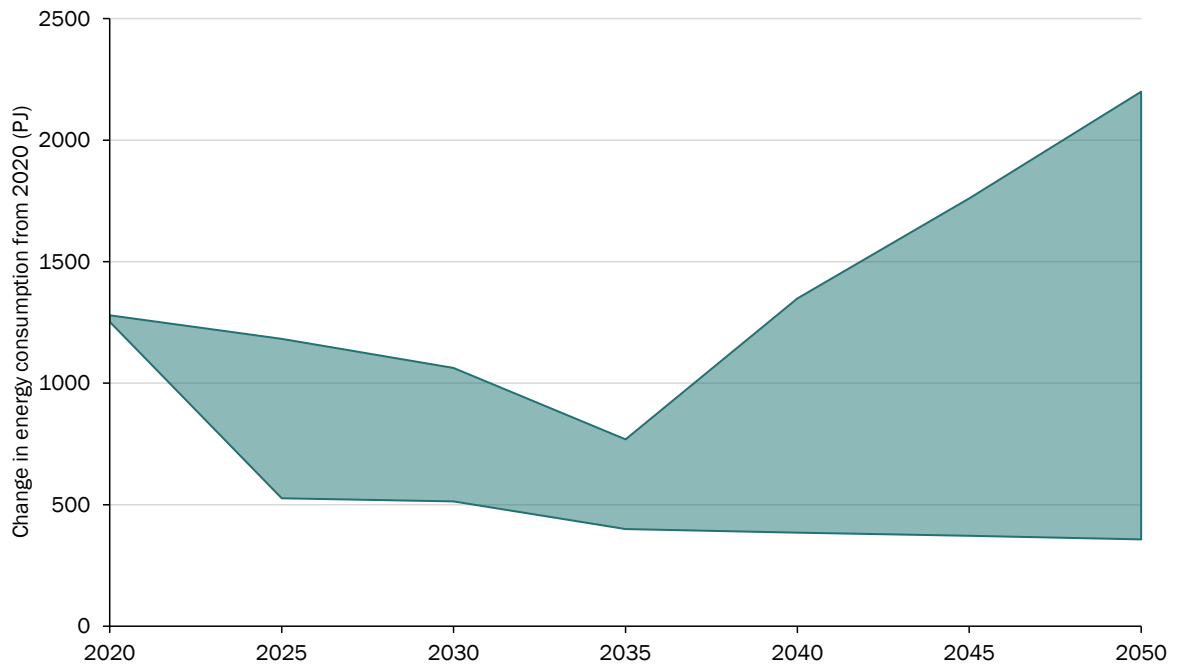
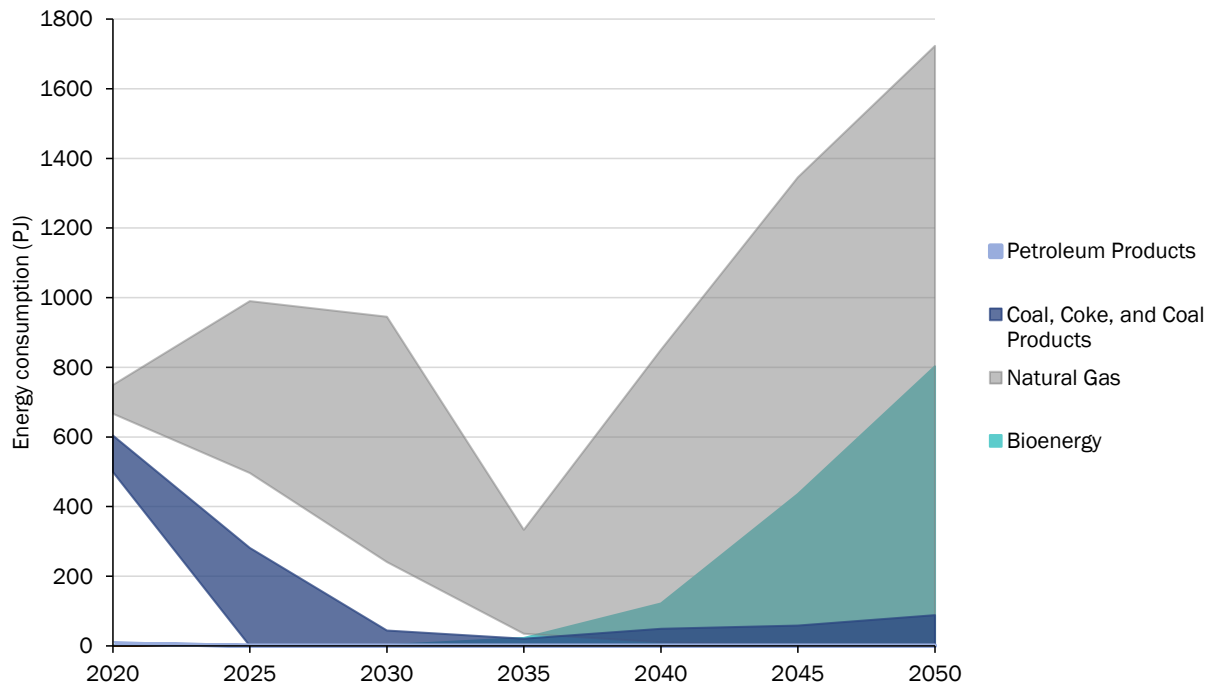


Figure 19 : Consommation énergétique des centrales thermiques par type de combustible³¹



3.2.4 Secteur industriel

Pétrole et gaz

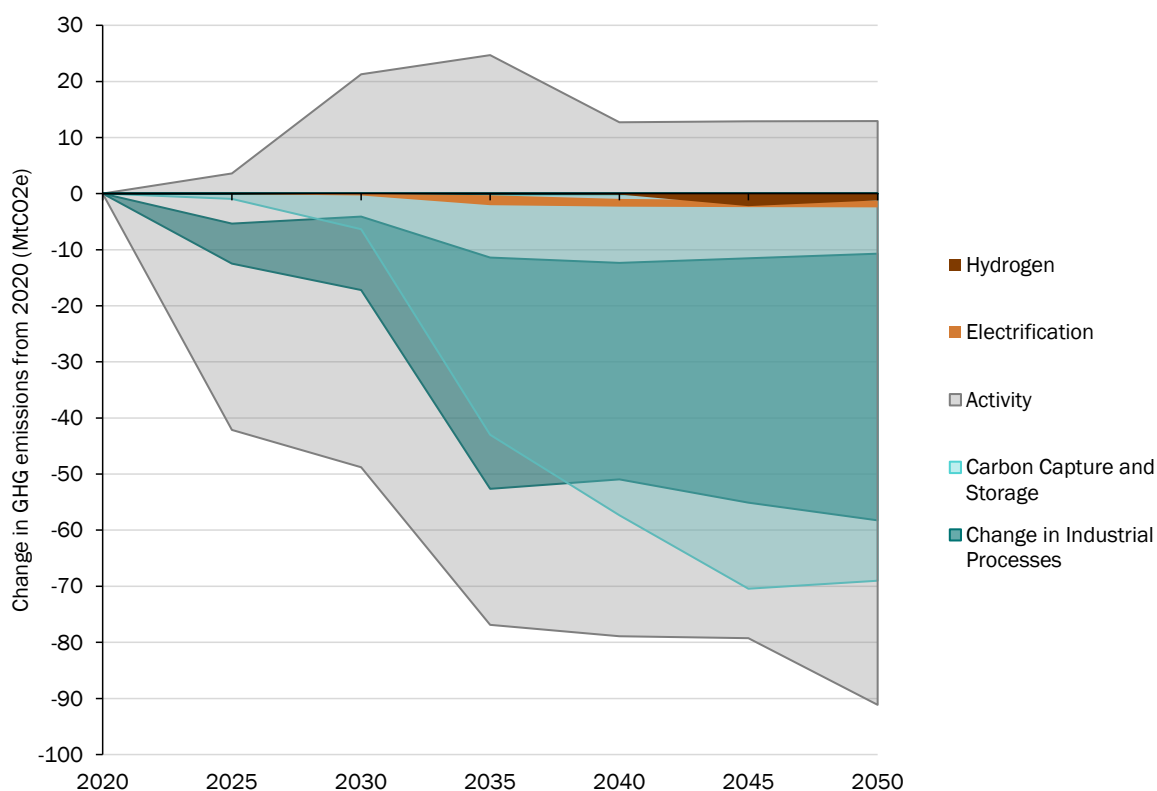
Selon notre analyse, l'avenir de la production pétrolière canadienne dépend en grande partie de la trajectoire empruntée par le Canada (et par la planète). Vu l'intensité des émissions sur l'ensemble du cycle de vie du pétrole, la production pétrolière du Canada en 2050 dépend de deux facteurs : la disponibilité de la technologie de CAD ainsi que l'ampleur de l'action climatique à l'échelle planétaire. La figure Figure 2020 présente l'ensemble des facteurs de réduction des émissions de ce secteur (production conventionnelle et sables bitumineux compris).

L'activité du secteur pétrolier varie nettement d'un scénario à l'autre. Si la CAD n'est pas disponible, la diminution de la production pétrolière est l'un des principaux facteurs d'atténuation de ce secteur, entraînant une réduction des émissions pouvant atteindre 82 Mt éq. CO₂ en 2050 dans les scénarios où d'autres grands pays se dotent d'une politique climatique et où la demande internationale de pétrole est à la baisse (pétrole à bas prix). Dans d'autres scénarios où la CAD permet de compenser les

³¹ Cette figure montre la consommation de combustible par les centrales thermiques. La production provenant de sources renouvelables et de sources stables d'électricité propre en est exclue.

émissions, la production pétrolière se poursuit, voire s'intensifie, jusqu'en 2050, ce qui mène à une augmentation d'émissions allant jusqu'à 13 Mt éq. CO₂ d'ici 2050 (compensées par la CAD). Dans les scénarios où la CSC est disponible, elle devient l'un des principaux facteurs de réduction des émissions du secteur (jusqu'à 69 Mt éq. CO₂). La diversification des procédés industriels (particulièrement la réduction des émissions de méthane par torchage et mise à l'air) est également un facteur d'atténuation dans ce secteur (de 11 à 58 Mt éq. CO₂ en 2050).

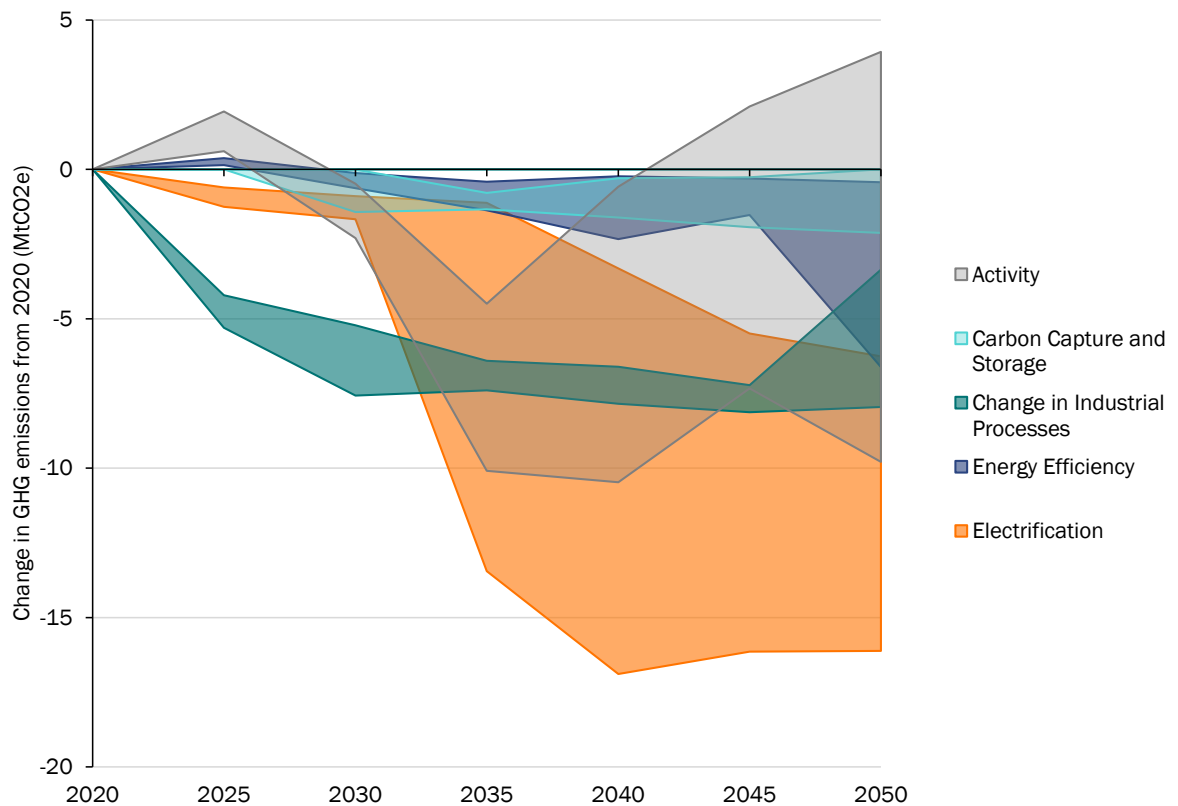
Figure 20 : Facteurs de réduction des émissions dans le secteur pétrolier



Comme celui du secteur pétrolier, l'avenir du secteur du gaz naturel au pays dépend largement de la trajectoire carboneutre empruntée par le Canada et par la planète. La Figure 2121, qui présente l'ensemble des facteurs de réduction de ce secteur, illustre l'incertitude quant à l'avenir de la production de gaz naturel. Dans les scénarios où la CAD devient disponible en 2035, une augmentation de la production de gaz naturel mène à une augmentation des émissions (compensées par la CAD) allant jusqu'à 4 Mt éq. CO₂ en 2050. Lorsque la CAD n'est pas disponible, le secteur connaît une baisse de production, ce qui représente un important facteur de réduction des émissions (jusqu'à 10 Mt éq. CO₂ en 2050).

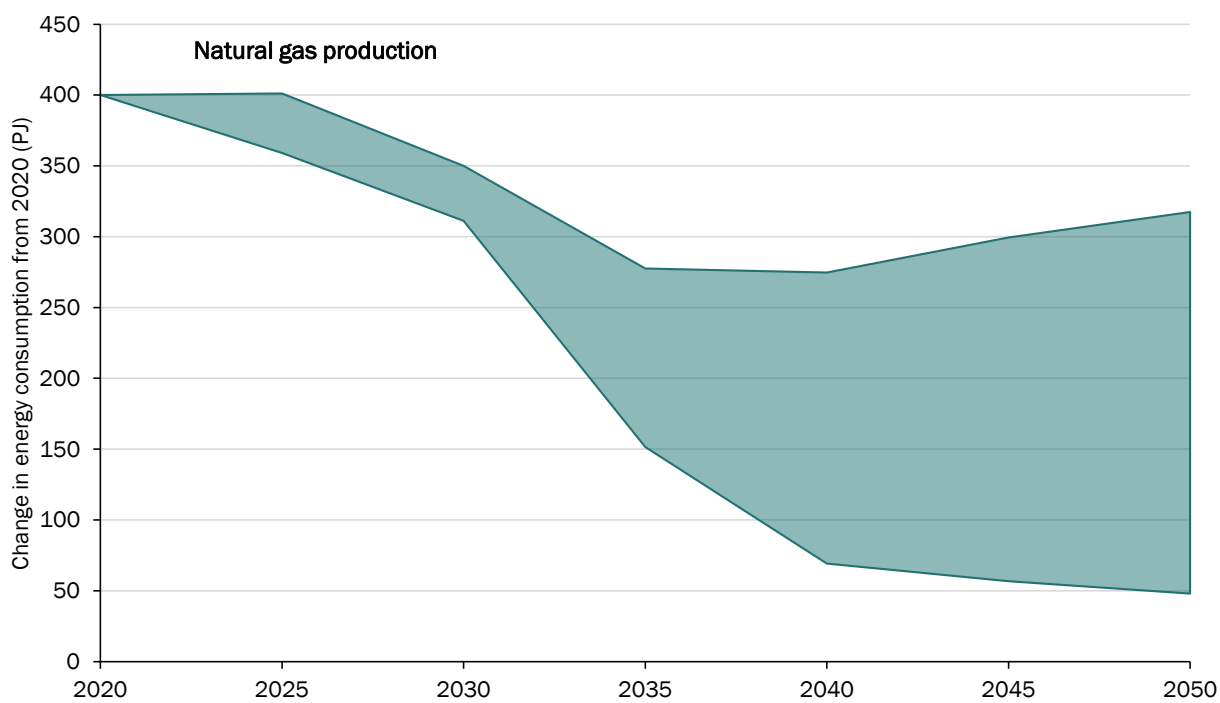
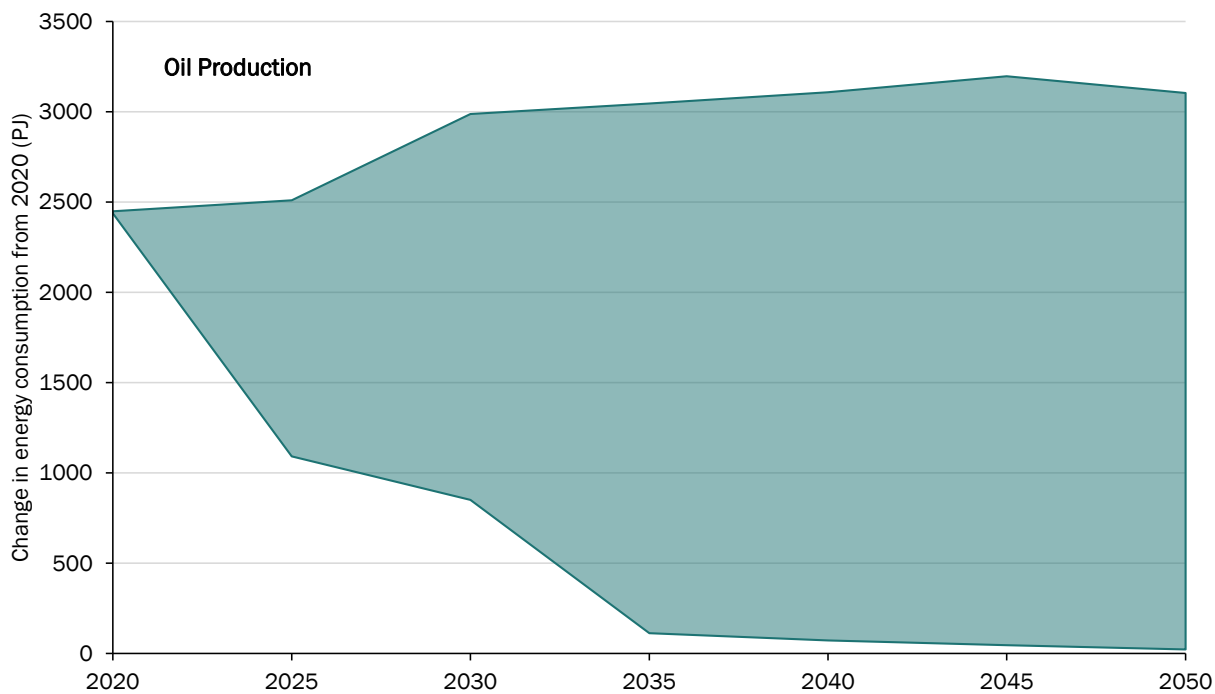
L'électrification est l'un des principaux facteurs de réduction de ce secteur, entraînant une diminution des émissions de 6 à 16 Mt éq. CO₂ en 2050, tous scénarios confondus. La réduction la plus marquée se produit lorsque, la CAD n'étant pas disponible, le secteur doit se tourner vers l'électrification pour parvenir à la décarbonisation. Les modifications apportées aux procédés industriels sont un autre facteur d'atténuation important dans le secteur du gaz naturel, toutes trajectoires confondues; la plupart des réductions sont alors attribuables à la réduction des émissions de méthane.

Figure 21 : Facteurs de réduction des émissions dans le secteur du gaz naturel



Le bilan de la consommation énergétique du secteur gazier et pétrolier varie en fonction de l'évolution de la production jusqu'en 2050 (Figure 2222). Certains scénarios où l'activité périclète (p. ex., en cas de non-disponibilité de la CAD) prévoient une diminution complète (jusqu'à 99 %) de la consommation énergétique du secteur pétrolier. D'autres prévoient une augmentation allant jusqu'à 27 % lorsque la disponibilité de la CAD permet la poursuite des activités. La consommation d'énergie dans le secteur du gaz naturel diminue par rapport à celle d'aujourd'hui, tous scénarios confondus (de 21 à 88 % en 2050).

Figure 22 : Bilan de la consommation énergétique du secteur pétrolier et gazier



Dans les scénarios où la production pétrolière se poursuit jusqu'en 2050, certains combustibles sont remplacés par de l'électricité, mais la consommation de pétrole et de gaz continue en parallèle (Figure 2323). Le gaz naturel continue à servir à produire de l'énergie dans tous les scénarios. Les différences dans la consommation d'énergie des différentes trajectoires sont principalement attribuables aux variations de l'activité des différents secteurs (Figure 2424).

Figure 23 : Consommation d'énergie par type de combustible dans le secteur pétrolier

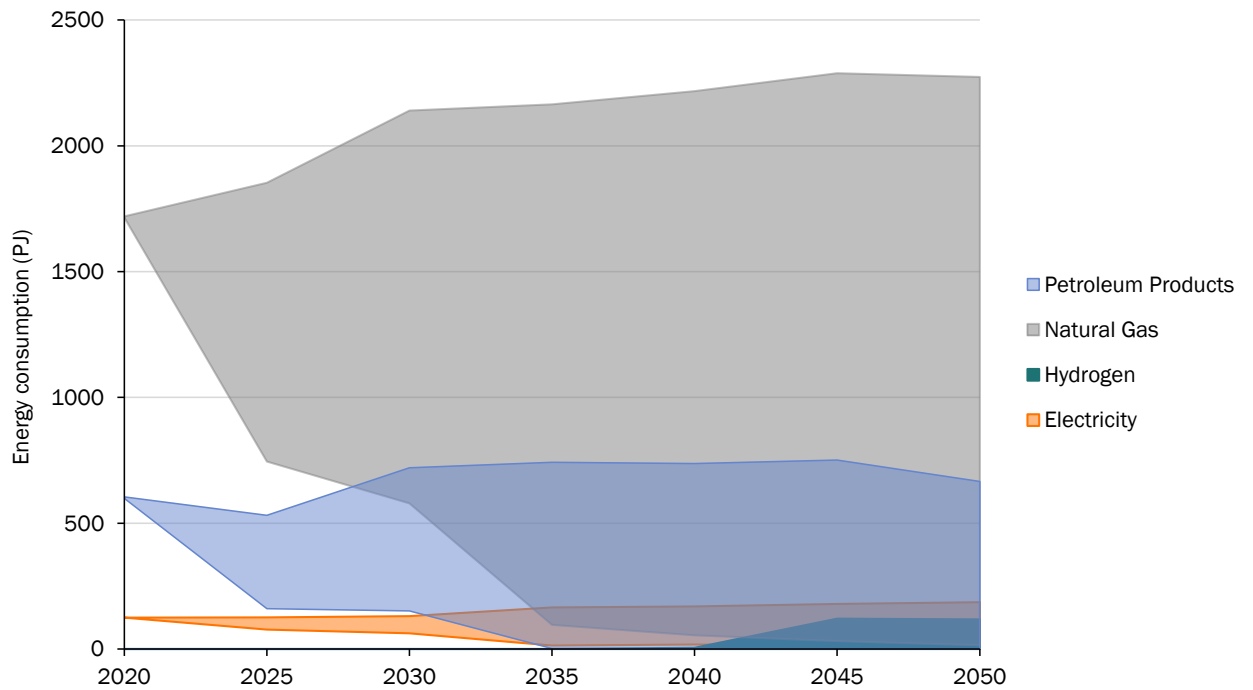
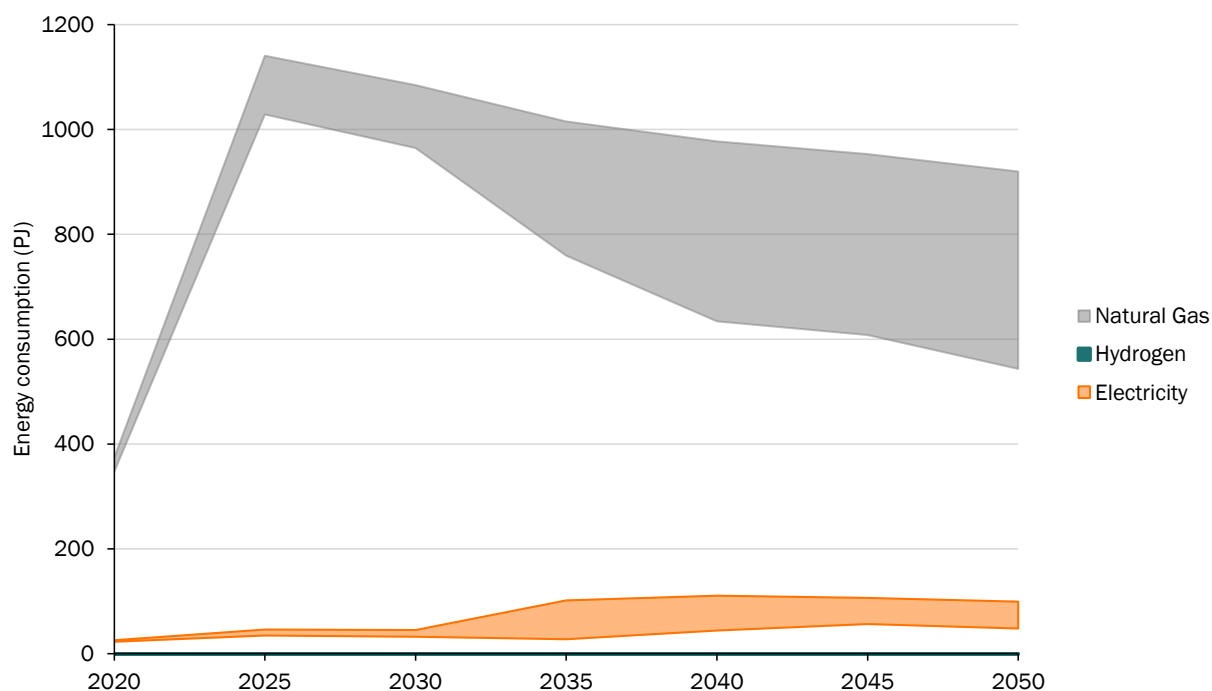


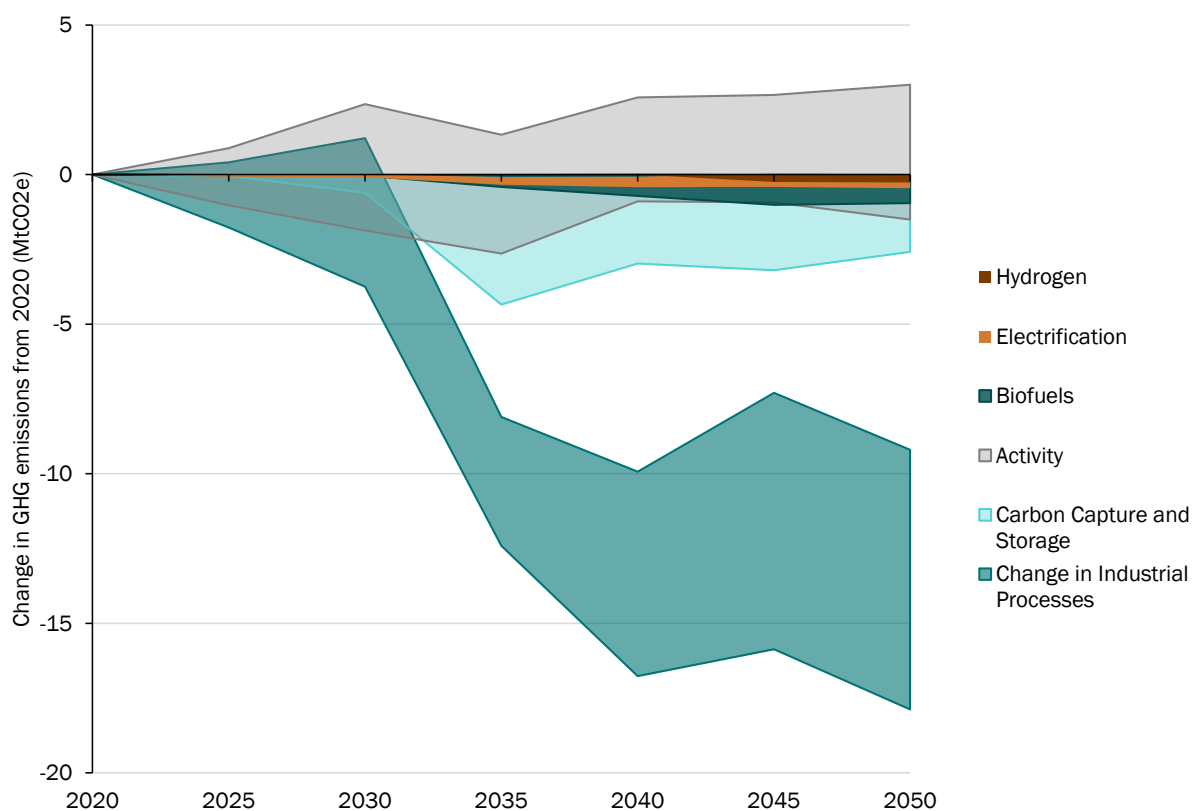
Figure 24 : Consommation d'énergie par type de combustible dans le secteur du gaz naturel



Secteur sidérurgique

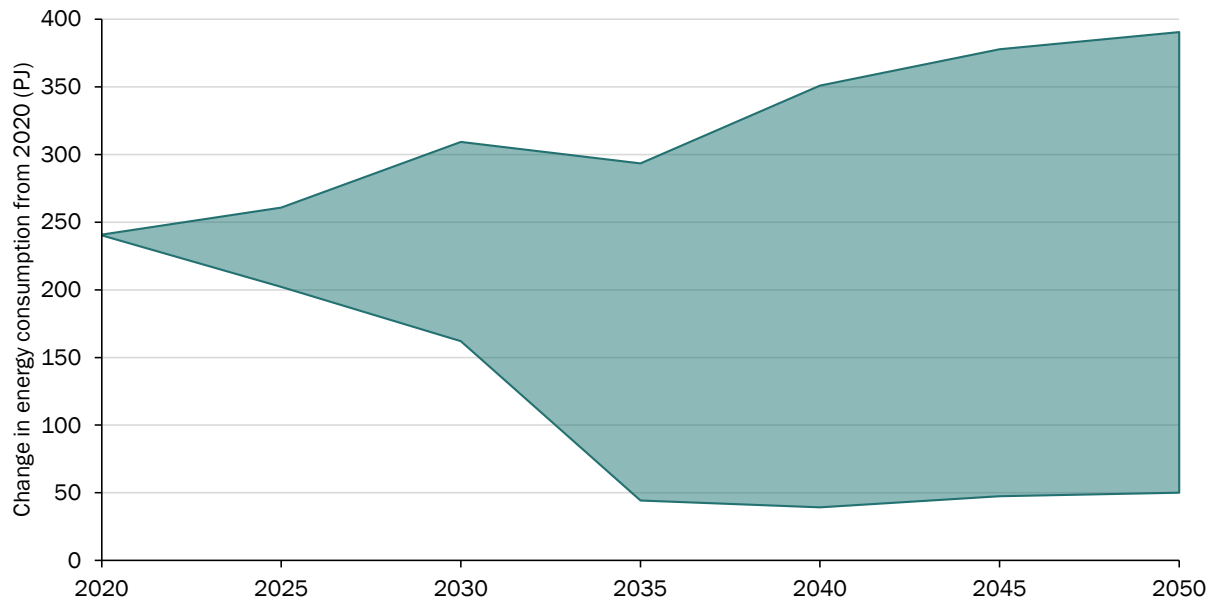
Les possibilités de réduction abordable dans le secteur sidérurgique permettent la décarbonisation complète du secteur, toutes trajectoires confondues. La production sidérurgique demeure relativement constante dans toutes les trajectoires, les réductions des émissions étant surtout provoquées par les modifications apportées aux procédés, ainsi que par la CSC lorsqu'elle est disponible. Les méthodes de production évoluent : la production d'acier polluante par convertisseurs basiques à oxygène (CBO) est délaissée au profit d'une production plus propre par fer de réduction directe (FRD), alimentée par du gaz naturel ou de l'hydrogène, ainsi que d'une plus grande production à partir d'acier recyclé. L'utilisation d'hydrogène pour produire de l'acier décarbonisé par CBO ou avec un four électrique à arc en Ontario nécessitera davantage d'électricité pour la production d'hydrogène propre ou son transport longue distance de l'Ouest du Canada. Ces nouveaux procédés entraînent une réduction de 9 à 18 Mt éq. CO₂ des émissions de 2050 à 2020. La Figure 2525 présente l'ensemble des facteurs de réduction de ce secteur.

Figure 25 : Facteurs de réduction des émissions du secteur sidérurgique



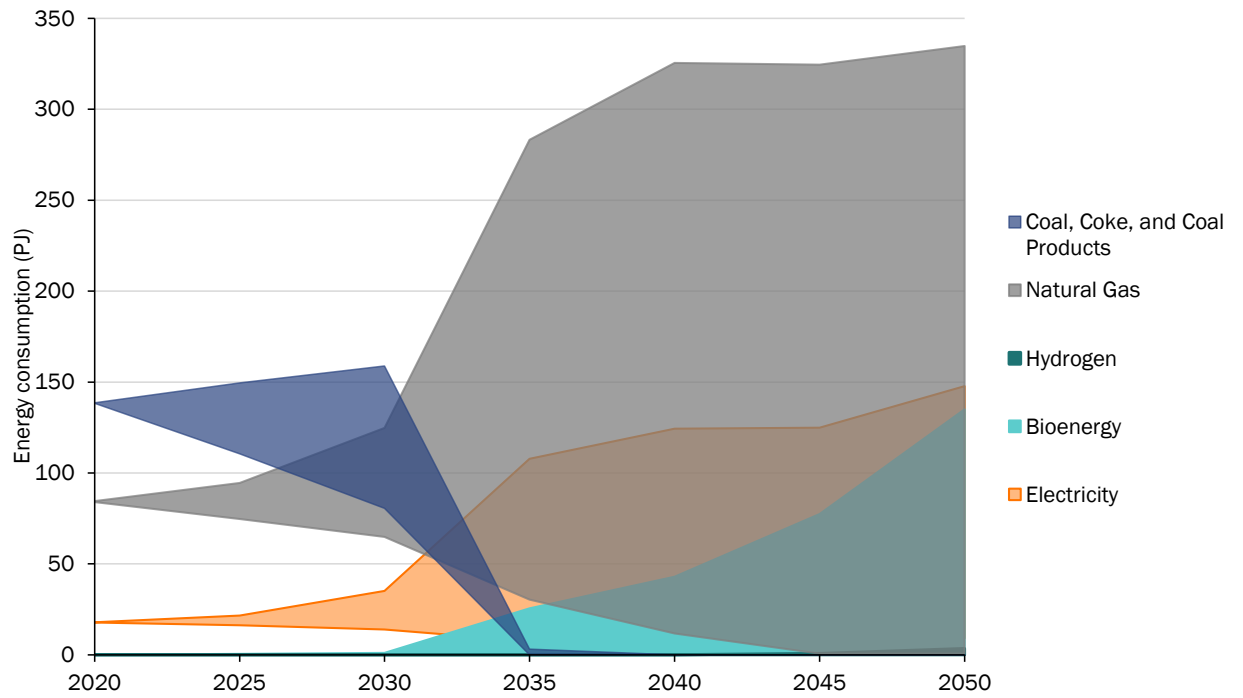
Le bilan de la consommation énergétique de ce secteur s'alourdit dans certains scénarios (augmentation de 62 %), tandis qu'il s'améliore dans d'autres, avec une diminution pouvant atteindre 79 % de 2020 à 2050 (Figure 2626). Avec la décarbonisation complète de la production sidérurgique d'ici 2050, ce secteur délaisse le charbon au profit du gaz naturel, de la bioénergie et de l'électricité (Figure 2727). La consommation de gaz naturel atteint un pic dans les scénarios prévoyant la disponibilité de la CSC, alors utilisée pour capter les émissions restantes. Lorsque la CSC n'est pas disponible, ce secteur se tourne vers l'électricité et la bioénergie.

Figure 26 : Bilan de la consommation énergétique du secteur sidérurgique³²



³² Cette figure comprend 61 des 62 scénarios de carboneutralité simulés dans le cadre de notre analyse. Le scénario exclu constitue une aberration flagrante.

Figure 27 : Consommation d'énergie par type de combustible dans le secteur sidérurgique³²



4. Grands constats

Des résultats de notre analyse, nous avons tiré les quatre grands constats que voici.

Premier constat : Le Canada a plusieurs options pour atteindre la carboneutralité d'ici le milieu du siècle.

L'objectif de carboneutralité du Canada est atteignable. Le pays pourrait atteindre son objectif d'ici 2050 avec des technologies et des options de dépollution industrielle qui sont déjà à sa portée. Deux principaux facteurs détermineront les modalités d'un Canada carboneutre :

- **Le coût et la disponibilité des technologies à émissions négatives.** Transformation du système énergétique canadien pour l'adapter à un monde carboneutre, utilisation à grande échelle de la CAD et de la CSC ou choix d'une trajectoire mixte : les décisions prises à l'échelle nationale auront de grandes répercussions sur le portrait économique d'un Canada carboneutre.
- **Demande de pétrole et de gaz canadien à l'international.** La croissance continue des opérations ou la chute de production de ce secteur au pays dépend grandement de la mise en œuvre, dans le reste du monde, d'une politique climatique rigoureuse parallèle à celle du Canada et de l'évolution de la demande de pétrole et de gaz naturel à l'international.

Deuxième constat : Le Canada aura probablement besoin d'un filet de sécurité pour atteindre la carboneutralité.

Dans certains secteurs (agriculture, ciment), le manque d'options de réduction représente un frein à la décarbonisation. Ainsi, l'atteinte de la carboneutralité au Canada nécessitera probablement le renfort d'une forme de technologie à émissions négatives (CAD, CSC, séquestration dans les sols ou les forêts, ou combinaison des trois). L'accessibilité, l'applicabilité à grande échelle et la rentabilité détermineront laquelle de ces technologies jouera un rôle majeur dans la décarbonisation de l'économie canadienne.

Dans notre analyse, lorsque la CAD se révèle viable, son application à grande échelle permet le maintien de certaines activités et utilisations finales polluantes jusqu'en 2050. Or, comme il s'agit d'une technologie en phase de précommercialisation, rien ne garantit que les hypothèses sur le coût et la disponibilité des CAD avancées dans cette étude se confirmeront. Ainsi, pour mettre toutes les chances de son côté, le Canada doit aller de l'avant sans compter sur ces technologies et emprunter une trajectoire

carboneutre indépendante de leur déploiement à grande échelle jusqu'à ce qu'il dispose de plus de données pour réviser son plan, s'il y a lieu.

Constat 3 : L'avenir du secteur pétrolier et gazier est incertain.

Le maintien de la production pétrolière et gazière au Canada ne se fera pas sans technologies à émissions négatives (CAD ou CSC). Si le Canada amorce sa transition vers la carboneutralité avant les autres grands pays et que, par conséquent, la demande mondiale de combustible fossile reste soutenue, les technologies à émissions négatives peuvent l'aider à poursuivre la production et l'exportation du pétrole et du gaz naturel pour répondre à la demande mondiale sans déroger de son propre objectif de carboneutralité. Inversement, si la demande mondiale s'essouffle à la suite de la mise en œuvre de politiques climatiques dans d'autres grands pays, une baisse de production marquée pourrait être à prévoir dans ce secteur.

Cependant, dans toutes les trajectoires vers la carboneutralité, les réductions de dioxyde de carbone deviennent une précieuse marchandise. Si la CAD et la CSC sont viables, le stockage de dioxyde de carbone représente en effet un marché profitable qui nécessite le transport de ce gaz vers des sites de séquestration. Pour l'Ouest canadien, qui produit le gaz et le pétrole et dispose d'un grand potentiel de stockage géologique, cette situation engendrerait un nouvel actif et de nouvelles possibilités.

Constat 4 : La trajectoire empruntée par le Canada repose sur des décisions que nous prenons maintenant.

Certaines mesures doivent obligatoirement être prises dans tous les scénarios analysés.

- **Hausse marquée de la capacité de production d'électricité** : électrification des transports, chauffage résidentiel, certains procédés industriels et utilisation potentiellement accrue de la CAD dans l'Ouest canadien.
- **Augmentation importante de la production de biocarburants** : recours croissant aux biocarburants pour le transport et aux GNR dans les bâtiments.
- **Investissements accrus dans les technologies d'énergie propre** : véhicules électriques, infrastructure de distribution d'électricité, CAD et production éolienne.
- **Investissements accrus dans les infrastructures de séquestration des GES** : construction de pipelines à la grandeur du pays pour transporter le dioxyde de carbone vers les sites de séquestration de l'Ouest.
- **Transition vers une décarbonisation complète de la sidérurgie** : par réduction directe du fer ou recyclage de l'acier.

Annexe A : Secteurs, combustibles et utilisations finales couverts

Tableau 8 : Secteurs

Nom du secteur	Code SCIAN
Culture du soja	11111
Culture de plantes oléagineuses (sauf le soja)	11112
Culture du blé	11114
Culture du maïs	11115
Autres cultures	Reste de 1111
Élevage et aquaculture	112
Foresterie et exploitation forestière	113
Pêche, chasse et piégeage	114
Activités de soutien à l'agriculture	115
Extraction de gaz naturel (classique)	211113
Extraction de gaz naturel (étanche)	
Extraction de gaz naturel (schiste)	
Extraction de pétrole léger	
Extraction de pétrole lourd	
Sables bitumineux in situ	211114
Extraction à ciel ouvert des sables bitumineux	
Valorisation du bitume (intégrée)	
Valorisation du bitume (par un tiers)	
Extraction de charbon	2121
Extraction de minerais métalliques	2122
Extraction et exploitation de minerais non métalliques	2123
Services pétroliers et gaziers	213111 à 213118
Autres activités de soutien à l'extraction minière	213119
Production d'électricité à partir de combustibles fossiles	221111
Production d'électricité à partir d'hydroélectricité et d'autres sources d'énergie renouvelable	221112 et 221119
Production d'électricité d'origine nucléaire	221113
Transport, gestion et distribution d'électricité	22112
Distribution de gaz naturel	2212
Construction	23
Fabrication d'aliments	311
Fabrication de boissons et de produits du tabac	312

couverts

Nom du secteur	Code SCIAN
Usines de textiles et de produits textiles, fabrication de vêtements, fabrication de produits en cuir et de produits analogues	313-316
Fabrication de produits en bois	321
Fabrication du papier	322
Raffineries de pétrole	32411
Fabrication de produits du charbon	Reste de 324
Fabrication de produits pétrochimiques	32511
Fabrication de gaz industriels	32512
Fabrication d'autres produits chimiques inorganiques de base	32518
Fabrication d'autres produits chimiques organiques de base	32519
Production de biodiesel à partir de matières organiques de canola	
Production de biodiesel à partir de matières organiques de soja	
Production d'éthanol à partir de matières organiques de maïs	
Production d'éthanol à partir de matières organiques de blé	
Production de DRHP (ou de RPH) à partir de matières organiques de canola	
Production d'essence et de diesel renouvelable	
Production d'éthanol cellulosique	
Fabrication de résines et de caoutchouc synthétique	3252
Fabrication d'engrais	32531
Fabrication d'autres produits chimiques	Reste de 325
Fabrication de produits en plastique	326
Fabrication de ciment	32731
Fabrication de chaux et de produits en gypse	3274
Fabrication d'autres produits minéraux non métalliques	Reste de 327
Sidérurgie	3311
Fabrication d'acier à l'arc électrique	
Fabrication de produits en acier à partir d'acier acheté	3312
Production et transformation d'alumine et d'aluminium	3313
Production d'autres métaux primaires	3314
Fonderies	3315
Fabrication de produits métalliques	332
Fabrication de machines	333
Fabrication de produits informatiques et électroniques, et de matériel, d'appareils et de composants électriques	334 et 335
Fabrication de matériel de transport	336
Autre fabrication	Reste de 31-33

Nom du secteur	Code SCIAN
Commerce de gros et commerce de détail	41-45
Transport aérien	481
Transport ferroviaire	482
Transport par eau	483
Transport par camion	484
Transport en commun et transport terrestre de voyageurs	485
Transport du pétrole brut par oléoduc	4861 et 4869
Transport du gaz naturel par gazoduc	4862
Autre transport (sauf entreposage et stockage)	4867-492
Collecte de déchets	562 en partie
Services	Reste de 51-91

Tableau 9 : Combustibles

Combustible
Combustibles fossiles
Charbon
Gaz de cokerie
Coke
Gaz naturel
Liquides de gaz naturel
Essence et diesel
Mazout lourd
Gaz de distillation
Électricité
Électricité
Hydrogène
Hydrogène produit par reformage du méthane à la vapeur
Hydrogène produit par électrolyse
Hydrogène produit par gazéification de biomasse
Combustibles renouvelables (non destinés au transport)
Liqueur résiduaire
Bois
Déchets de bois (industriels)
Gaz naturel renouvelable
Carburants renouvelables (destinés au transport)
Éthanol produit à partir de maïs
Éthanol produit à partir de blé
Éthanol cellulosique
Biodiesel produit à partir de canola
Biodiesel produit à partir de soja
Diesel renouvelable produit par hydrogénation (DRPH)
Essence et diesel renouvelables produits par pyrolyse de biomasse
Gaz naturel renouvelable

Tableau 10 : Utilisations finales

Utilisation finale
Énergie industrielle fixe/sources d'émissions
Production d'électricité à partir de combustibles fossiles
Chaleur industrielle
Chaleur industrielle (fabrication de ciment et de chaux)
Chauffage (régions éloignées sans accès au gaz naturel)
Cogénération
Compression pour production et transport de gaz naturel
Forte compression pour production de GNL
Moteurs électriques (industrie)
Consommation d'électricité (autre)
Transport
Déplacement aérien
Autobus
Transport ferroviaire
Méto léger pour transport des personnes
Transport maritime
Véhicules légers
Transport de marchandises par camion
Services de diesel (pour simuler les options de biocarburants et autres diesels renouvelables)
Services d'essence (pour simuler les options d'éthanol)
Émissions fugitives de pétrole et de gaz
Élimination du CO ₂ issu du traitement du gaz naturel
Torchage (zones à proximité des pipelines de gaz naturel)
Torchage (zones éloignées des pipelines de gaz naturel)
Mise à l'air et fuites de méthane (secteur pétrolier et gazier)
Procédés industriels
Émissions de GES - produits minéraux
Électrolyse de l'aluminium
Consommation de coke métallurgique (production d'acier)
Production d'hydrogène (raffinage du pétrole et fabrication de produits chimiques)
Consommation d'énergie autre que les combustibles (fabrication de produits chimiques)
Production d'acide nitrique
Agriculture
CH ₄ issu de procédés pour lequel il n'y a aucune option de réduction (fermentation entérique)
Gestion du fumier
Sols agricoles

Utilisation finale

Déchets

Gestion des gaz de dépotoirs

Bâtiments résidentiels

Habitation unifamiliale isolée (enveloppe)

Habitation unifamiliale attenante (enveloppe)

Appartement (enveloppe)

Charge thermique

Fournaies

Climatisation

Éclairage

Lave-vaisselle

Lave-linge

Sèche-linge

Cuisinières

Eau chaude du robinet

Réfrigérateurs

Congélateurs

Eau chaude

Autres électroménagers

Bâtiments commerciaux

Commerces de détail alimentaires (enveloppe)

Immeubles de bureau (enveloppe)

Commerce de détail autre qu'alimentaire (enveloppe)

Établissements scolaires (enveloppe)

Entrepôts (enveloppe)

Autre bâtiment commercial (enveloppe)

Charge thermique (bâtiments commerciaux)

Eau chaude (bâtiments commerciaux)

Éclairage (bâtiments commerciaux)

Climatisation (bâtiments commerciaux)

Équipement auxiliaire

Moteurs auxiliaires (bâtiments commerciaux)

Annexe B : Décomposition du calcul des émissions

Une multitude de facteurs font varier les émissions de GES, facteurs qui interviennent parfois simultanément. Par exemple, le virage électrique en transport pourrait coïncider avec une augmentation de la teneur en carburant renouvelable dans les postes de distribution d'essence. Il est donc difficile d'associer une variation des émissions de GES à un seul facteur.

Pour contourner ce problème, Navius a eu recours à une analyse de décomposition basée sur l'indice de la moyenne logarithmique de Divisia (IMLD)³³, qui décompose une variation donnée dans les émissions de GES en cinq facteurs que voici :

$$GES = \sum_p \frac{S_p}{E} \sum_{uf} \frac{UF_{p,uf}}{S_p} \sum_t \frac{T_{p,uf,t}}{UF_{p,uf}} \frac{GES_{p,uf,t}}{T_{p,uf,t}}$$

Les émissions de GES provenant de la production d'un bien ou d'un service se décomposent donc ainsi :

1. Extrant (E). Toutes choses étant égales par ailleurs, une augmentation de la production entraîne généralement (mais pas toujours) une hausse des émissions de GES. Ici, « extrant » équivaut à la production totale d'un bien ou d'un service.
2. Part sectorielle de l'extrant (S_p/E). Certains produits sont fabriqués par plus d'un secteur. Par exemple, la Colombie-Britannique compte trois régions productrices de gaz naturel aux méthodes (classique, Montney et Horn River) et aux profils de GES distincts. Une production accrue de gaz naturel dans la région de Montney (dont l'intensité carbonique est moindre) par rapport aux autres régions ferait diminuer les émissions de GES. L'hydrogène, l'acier et le ciment sont aussi produits par des secteurs différents.
3. Efficacité énergétique de l'utilisation finale ($UF_{p,uf}/S_p$). La diminution d'une utilisation finale émettrice de GES ($UF_{p,uf}$) dans un secteur (S_p) se traduit par une baisse d'émissions de GES. Par exemple, le choix d'un mode de transport

³³Ang, B.W. 2005. « The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide ». *Energy Policy*, vol. 33, p. 867-871.

moins polluant par les ménages d'un niveau de revenu donné se traduit par une réduction des émissions de GES.

4. Part de la technologie ($T_{p,uf,t}/UF_{p,uf}$). L'utilisation accrue d'une certaine technologie propre ($T_{j,eu,t}$) pour répondre à une demande d'utilisation finale ($UF_{p,uf}$) fait diminuer les émissions de GES.
5. Intensité des GES ($GES_{p,uf,t}/T_{p,uf,t}$). Une diminution de l'intensité en GES d'une technologie se traduit par une baisse d'émissions. Par exemple, l'intensité en GES d'un véhicule à essence peut diminuer si l'on ajoute une plus grande quantité de biocarburants au mélange d'essence.

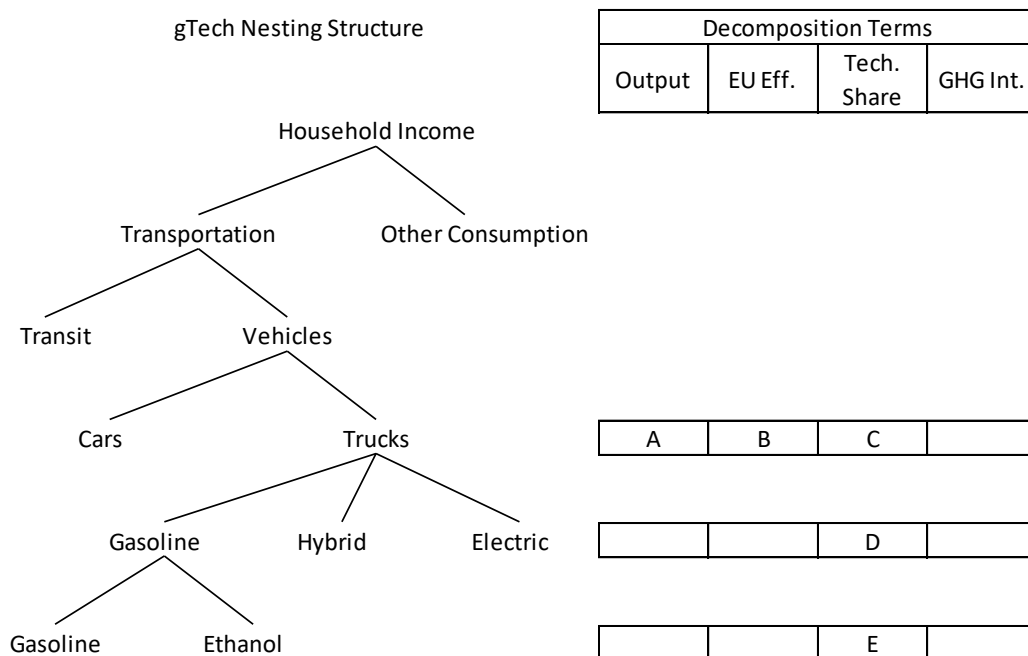
Les résultats de cette analyse de décomposition nous permettent de dresser un portrait détaillé des facteurs de variation des émissions de GES associés à un resserrement des politiques. La Figure 2828 montre ce phénomène. Le diagramme de gauche illustre une série de décisions imbriquées dans le secteur du transport des personnes telle que modélisée par gTech. Tout en haut figure la décision d'un ménage de consacrer ses revenus à des services de transport plutôt qu'à d'autres produits de consommation (p. ex., restauration). À l'étape suivante, il décide de se déplacer soit en transport en commun, soit en voiture. Suivent des décisions quant à la taille, au type de moteur, et enfin au type de carburant.

Les émissions sont décomposées en cinq facteurs (dans le cas du transport de passagers, le terme correspondant à la part sectorielle peut être ignoré) à chaque niveau de la structure décisionnelle. Le portrait de la réduction des émissions se découpe ensuite de la manière suivante.

- A) Extrant : les réductions de GES associées au choix de la taille du véhicule (camionnette ou automobile) montrent l'influence du revenu des ménages sur leur mode de transport.
- B) Efficacité énergétique de l'utilisation finale : les réductions de GES associées au choix de la taille du véhicule en fonction de son efficacité illustrent le recours plus généralisé au transport en commun ou à d'autres services plutôt qu'à l'automobile dans un contexte de resserrement des politiques climatiques.
- C) Part technologique : les réductions de GES associées au choix de la taille du véhicule sont attribuables à l'achat de véhicules plus ou moins gros par les ménages.

- Notons que l'intensité en GES, toutes tailles de véhicule confondues, varie selon le moteur choisi ou la part de biocarburant consommée par les ménages. Toutefois, ce sont les décisions suivantes qui mesurent le mieux les réductions engendrées par ces facteurs.
- D) Part technologique : les réductions de GES associées au choix du moteur représentent les divers types de véhicules achetés par les ménages (moteur électrique ou à combustion interne).
- L'extrant et l'efficacité énergétique de l'utilisation finale, qui dépendent du choix de la taille du véhicule, ne sont pas considérés ici.
- E) Part technologique : enfin, les réductions de GES associées au choix de carburant (essence ou éthanol) illustrent la réduction des émissions des ménages entraînées par l'utilisation de biocarburants à plus haute teneur en biocarburant.

Figure 28 : Exemple de structure de décomposition du secteur du transport des personnes



Annexe C : Possibilités de réduction par secteur

Tableau 11 : Possibilités de réduction – Industries

Secteur économique	Principales possibilités de réduction des GES	Sources des données
Combustion fixe		
Production d'électricité	Énergies renouvelables	IESD
	Efficacité énergétique	EIA (2019)
Chaleur industrielle (haute température)	Remplacement des combustibles	Park et coll. (2017), CIMS
	Captation et stockage de carbone	CIMS
	Énergie renouvelable (biomasse et GNR)	DENA (2016)
	Résistance électrique	Park et coll. (2017), CIMS
Chaleur industrielle (basse température)	Remplacement des combustibles	Park et coll. (2017), CIMS
	Captation et stockage de carbone	CIMS
	Énergie renouvelable (biomasse et GNR)	DENA (2016)
	Thermopompes électriques	Onmen et coll. (2015)
Compression	Électrification	Greenblatt (2015)
	Électrification des GNL	ABB (2010)
Cogénération industrielle	Cogénération	gTech
Production d'acier	Réduction directe du fer (gaz naturel)	Fishedick et coll. (2014).
	Réduction directe du fer (hydrogène)	Vogl et coll. (2018)
Sources fugitives		
Méthane de houille	Aucune réduction possible	
Mise à l'air et fuites de méthane	Diverses mesures de détection et de réduction des fuites	ICF International (2015), Clearstone Engineering (2014)
Formation CO ₂	Captation et stockage de carbone	CIMS
Torchage	Installations pétrolières : production de gaz naturel Installations de gaz naturel : pas de réduction	Johnson et Coderre (2012)
Procédés industriels		
Production d'hydrogène	Captation et stockage de carbone	Département de l'Énergie des États-Unis (2014)
	Électrolyse	Département de l'Énergie des États-Unis (2014)

Calcination du calcaire	Aucune réduction possible	
CO ₂ de l'aluminium	Aucune réduction possible	
PFC de l'aluminium	Réduction des PFC par contrôle informatique	CIMS
Autres procédés	Aucune réduction possible	
Agriculture		
Fermentation entérique	Aucune réduction possible	
Gestion du fumier	Digesteur anaérobie pour produire des GNR	PASTE-AIE (2013)
Sols agricoles	Aucune réduction possible	
Séquestration atmosphérique		
Séquestration atmosphérique	Captation atmosphérique directe	Fasihi et coll. (2019), Keith et coll. (2019)

Tableau 12 : Possibilités de réduction – Transport

Source de GES	Principales possibilités de réduction	Sources de données
Énergie – Transport		
Véhicules légers et lourds	Gains d'efficacité	EIA (2019)
	Gaz naturel et gaz renouvelable	IRENA (2013), APEC (2010), AAC (2017), Kludze et coll. (2013), Yemshanov et coll. (2014), Petrolia (2008), (S&T) ² Consultants (2012), Chavez-Gherig et coll. (2017), G4 Insights (2018), PASTE-AIE (2013), Hallbar Consulting (2016)
	Électrification	Bloomberg (2019), Moawad et coll. (2016), Argonne (2018), Curry (2017), U.S. DOE (2013), Bloomberg (2018), ICCT (2017), ICCT (2019), Fries (2017), Mayor's Council (2018)
	Carburants renouvelables	IRENA (2013), APEC (2010), AAC (2017), Kludze et coll. (2013), Yemshanov et coll. (2014), Petrolia (2008), (S&T) ² Consultants, (2012), Chavez-Gherig et coll. (2017), G4 Insights (2018), PASTE-AIE (2013), Hallbar Consulting (2016)

	Hydrogène	SA Consultants (2017), SA Consultants (2019), AIE (2019), NREL (2013), NREL (2019A), NREL (2019B)
Navigation intérieure	Gains d'efficacité	CIMS
Vols intérieurs	Aucune réduction possible	CIMS
Transport ferroviaire	Carburants renouvelables	Voir la liste de carburants renouvelables plus haut.
Procédés industriels et utilisation de produits		
Véhicules légers et lourds	Réduction établie conformément aux politiques fédérales de réduction des HFC	

Tableau 13 : Possibilités de réduction – Bâtiments et communautés

Source de GES	Principales possibilités de réduction	Sources de données
Combustion fixe		
Chauffage intérieur	Meilleure isolation de l'enveloppe des bâtiments	RDH (2018)
	Gains d'efficacité des fournaies et chaudières au gaz naturel	EIA (2016), NREL (2018)
	Gaz renouvelable	IRENA (2013), APEC (2010), AAC (2017), Kludze et coll. (2013), Yemshanov et coll. (2014), (S&T) ² Consultants, (2012), Chavez-Gherig et coll. (2017), G4 Insights (2018), PASTE-AIE (2013), Hallbar Consulting (2016)
Chauffe-eau	Chauffage et chauffe-eau électriques (résistance et thermopompe)	EIA (2016), NREL (2018)
	Gain d'efficacité des chauffe-eau et chaudières au gaz naturel	EIA (2016), NREL (2018)
	Gaz naturel renouvelable	Voir la liste de carburants renouvelables plus loin.
Cuisson	Chauffe-eau électriques (résistance et thermopompe)	EIA (2016), NREL (2018)
	Cuisinières électriques ou au gaz naturel	EIA (2016), NREL (2018)
Procédés industriels		
Climatisation	Meilleure isolation de l'enveloppe des bâtiments	RDH (2018)
	Réduction établie conformément aux politiques fédérales de réduction des HFC	
Équipement auxiliaire	Efficacité	CIMS
Déchets		
Déchets	Captation du méthane pour torchage, production d'électricité ou approvisionnement du réseau de distribution de gaz naturel	ME C.-B. (2017)
	Réacheminement des déchets organiques	ME C.-B. (2017)

Références

ABB (2010). *All electric LNG plants: Better, safer, more reliable – and profitable* :

https://library.e.abb.com/public/9e770a172afc8d7ec125779e004b9974/Paper%20LNG_Rev%20A_lowres.pdf.

- Agence allemande de l'énergie (DENA). (2016). [*Process heat in industry and commerce: technology solutions for waste heat utilisation and renewable provision.*](#)
- Agence d'information sur l'énergie (EIA). (2016). *Analysis & Projections: Updated Buildings Sector Appliance and Equipment Costs and Efficiency* : <https://www.eia.gov/analysis/studies/buildings/equipcosts/>.
- Agence d'information sur l'énergie (EIA). (2019). *Annual Energy Outlook 2019* : <https://www.eia.gov/outlooks/archive/aeo18/>.
- Agence internationale de l'énergie (AIE). *The Future of Hydrogen.* :<https://www.iea.org>.
- Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA). (2013). *Road transport: the cost of renewable solutions.*
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) (2017). *Biomass Agriculture Inventory Median Values* : <https://open.canada.ca/fr>.
- Argonne. (2018). *U.S. DOE Benefits & Scenario Analysis.*
- Asia-Pacific Economic Cooperation (APEC). (2010). *Biofuel Costs, Technologies and Economics in APEC Economies.*
- Bergerson Consulting (2019, inédit). *Upstream Emissions Intensities of Current and Potential Global LNG Projects.*
- Bloomberg New Energy Finance (2018). *Electric Buses in Cities: Driving Towards Cleaner Air and Lower CO₂* : about.bnef.com.
- Bloomberg New Energy Finance (2019). *Electric Vehicle Outlook 2019* : <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/#toc-viewreport>.
- Chavez-Gherig, A., P. Ducru et M. Sandford (2017). *The New Jersey Pinelands and the Green Hospital, NRG Energy Case Study.*
- CIMS. Base de données sur la technologie. Conçue par Navius Research, Inc.
- Clearstone Engineering (2014). *Canadian Upstream Oil and Gas Emissions Inventory.*
- Curry, C. (2017). *Lithium-ion Battery Costs and Market*, Bloomberg New Energy Finance.
- Département de l'Énergie des États-Unis (U.S. DOE). (2013). *EV Everywhere Grand Challenge Blueprint.*
- Département de l'Énergie des États-Unis (2014). *H2A Hydrogen Production Analysis Models: Current Central Hydrogen Production from Coal with CO₂ Sequestration version 3.101* : <https://www.nrel.gov/hydrogen/h2a-production-models.html>.
- Fasihi et coll. (2019). « Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants ».
- Fischedick et coll. (2014). « Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies ».
- Fries et coll. (2017). « An Overview of Costs for Vehicle Components, Fuels, Greenhouse Gas Emissions and Total Cost of Ownership Update 2017 ».
- G4 Insights Inc. (2018). « Our Technology » : <http://www.g4insights.com/about.html>.
- GHGenius 4.03. (2018). *GHGenius: a model for lifecycle analysis of transportation fuels* : <https://www.ghgenius.ca>.

Greenblatt, J. (2015). *Opportunities for Efficiency Improvements in the U.S. Natural Gas Transmission, Storage and Distribution System*.

Hallbar Consulting. (2016). *Resource supply potential for renewable natural gas in B.C.*

ICCT. (2019). *Estimating the infrastructure needs and costs for the launch of zero-emission trucks* : <https://theicct.org/>.

ICF International. (2015). *Economic Analysis of Methane Emission Reduction Opportunities in the Canadian Oil and Natural Gas Industries*.

International Council on Clean Transportation (ICCT). (2017). *Transitioning to zero-emission heavy-duty freight vehicles* : <https://theicct.org/>.

Johnson, M., et A. Coderre, (2012). « Opportunities for CO₂ equivalent emissions reductions via flare and vent mitigation: a case study for Alberta, Canada ». *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 8, p. 121-131.

Jones, S., P. Meyer, L. Snowden-Swan, A. Padmaperuma, E. Tan, A. Dutta, J. Jacobson et K. Cafferty, (2013). *Process design and economics for the conversion of lignocellulosic biomass to hydrocarbon fuels: fast pyrolysis and hydrotreating bio-oil pathway* (n° PNNL-23053; NREL/TP-5100-61178). Pacific Northwest National Lab. (PNNL), Richland, Washington (États-Unis).

Keith et coll. (2018). « A process for capturing CO₂ from the atmosphere ».

Kludze, H., B. Deen, A. Weersink, R. van Acker, K. Janovicek, A. De Laporte et I. McDonald, (2013). « Estimating sustainable crop residue removal rates and costs based on soil organic matter dynamics and rotational complexity ». *Biomass and Bioenergy*, vol. 56, p. 607-618.

« Mayor's Council On Regional Transportation ». (2018). Ordre du jour de l'assemblée publique du 21 septembre 2018 : <https://www.translink.ca/>.

Moawad, A., N. Kim, N. Shidore et A. Rousseau (2016). « Assessment of vehicle sizing, energy consumption and cost through large scale simulation of advanced vehicle technologies », (N° ANL/ESD-15/28). Argonne National Lab. (ANL), Argonne, Illinois (États-Unis).

Ministère de l'Environnement de la Colombie-Britannique (ME C.-B.). (2017). *Technical Methods and Guidance Document 2007-2012 reports*, Community Energy and Emissions Inventory (CEEI) Initiative.

National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2013). *Hydrogen Station Cost Estimates*. :<https://nrel.gov>.

NREL. (2018). *National Residential Efficiency Measures Database* : <https://remdb.nrel.gov/>.

NREL. (2019A). *H2A: Hydrogen Analysis Production Case Studies* : <https://hydrogen.energy.gov>.

NREL. (2019B). *Market Segmentation Analysis of Medium and Heavy Duty Trucks with a Fuel Cell Emphasis* : <https://hydrogen.energy.gov>.

Ommen, T., J. Jensen, W. Markussen, L. Reinholdt et B. Elmegaard, (2015). « Domaines techniques et économiques de fonctionnement de pompes à chaleur industrielles : Partie 1- Pompes à chaleur à compression de vapeur mono-étagées », *International Journal of Refrigeration*, vol. 55, p. 168-182.

- Park, N., S. Park, J.Kim, D. Choi, B. Yun et J. Hong, (2017). « Technical and economic potential of highly efficient boiler technologies in the Korean industrial sector », *Energy*, vol. 121, p. 884-891.
- Petrolia, R. (2008). « The economics of harvesting and transporting corn stover for conversion to fuel ethanol: A case study for Minnesota », *Biomass and Bioenergy*, vol. 32, p. 603-612.
- Programme d'analyse systémique de technologies énergétiques de l'Agence internationale de l'énergie (PASTE-AIE). (2013). *Biogas and bio-syngas production*.
- RDH Building Science. (2018). *Building shell performance and cost data*. Préparé pour Navius Research.
- SA Consultants. (2017). *Mass Production Cost Estimation of Direct H2 PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2016 Update* : <https://www.hydrogen.energy.gov/>.
- SA Consultants. (2019). *2019 DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Review Presentation* : <https://www.hydrogen.energy.gov/>.
- (S&T)² Consultants Inc. (2012). *Update of Advanced Biofuel Pathways in GHGenius*.
- Transports Canada. (2011). *Frais d'exploitation du camionnage et du transport intermodal de surface au Canada*.
- UBS Evidence Lab, Global Research. (2017). *UBS Evidence Lab Electric Car Teardown – Disruption Ahead?* : <https://neo.ubs.com/shared/d1wkuDIEbYPjF/>.
- Vogl et coll. (2018). « Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking ».
- Yemshanov, D., D.W. McKenney, S. Fraleigh, B. McConkey, T. Huffman et S. Smith, (2014). « Cost estimates of post harvest forest biomass supply for Canada ». *Biomass and Bioenergy*, vol. 69, p. 80-94.

Annexe D : Liste des scénarios de carboneutralité

Scénario	Hypothèse																							
	Prix des véhicules électriques à batterie		Prix des véhicules à pile à combustible hydrogène		Coût de production du combustible hydrogène		Taux limite d'hydrogène		Disponibilité de nouvelles sources stables de production d'électricité		Politiques climatiques carboneutres dans le reste du monde		Disponibilité de la CSC pour la combustion des émissions		Disponibilité de la CAD		Cours mondial du pétrole		Mesures protectionnistes		Disponibilité des biocarburants de deuxième génération		Réduction de l'intensité en émission du secteur des sables bitumineux	
	Réf	Bas	Réf	Bas	Réf	Bas	Réf	Haut	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Réf	Bas	Non	Oui	Non	Oui	Réf	Accélérée
1	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
2	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
3	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
4	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
5	✓		✓		✓		✓			✓	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
6	✓		✓		✓		✓			✓	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
7		✓	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
8		✓	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
9		✓	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
10		✓	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
11		✓	✓		✓		✓			✓	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
12		✓	✓		✓		✓			✓	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
13		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓
14		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓
15		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓
16		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓
17	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
18	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
19	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
20	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
21	✓		✓		✓		✓			✓	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
22	✓		✓		✓		✓			✓	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
23		✓	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
24		✓	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
25		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓
26		✓	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
27		✓	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
28		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓
29		✓	✓		✓		✓			✓	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
30		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓
31		✓	✓		✓		✓			✓	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓
32		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓
33	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓

Scénario	Hypothèse																							
	Prix des véhicules électriques à batterie		Prix des véhicules à pile à combustible hydrogène		Coût de production du combustible hydrogène		Taux limite d'hydrogène		Disponibilité de nouvelles sources stables de production d'électricité		Politiques climatiques carboneutres dans le reste du monde		Disponibilité de la CSC pour la combustion des émissions		Disponibilité de la CAD		Cours mondial du pétrole		Mesures protectionnistes		Disponibilité des biocarburants de deuxième génération		Réduction de l'intensité en émission du secteur des sables bitumineux	
	Réf	Bas	Réf	Bas	Réf	Bas	Réf	Haut	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Réf	Bas	Non	Oui	Non	Oui	Réf	Accélérée
34		✓	✓		✓	Bas	✓		✓	Oui	✓		✓	Oui	✓		✓	Bas	✓	Oui	✓		✓	✓
35	✓		✓		✓		✓				✓	✓		✓	✓		✓		✓			✓	✓	✓
36		✓	✓		✓		✓				✓	✓		✓	✓		✓		✓			✓	✓	✓
37		✓		✓		✓		✓			✓	✓		✓	✓		✓		✓			✓	✓	✓
38	✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓		✓				✓		✓	✓	✓
39		✓	✓		✓		✓		✓		✓		✓	✓		✓				✓		✓	✓	✓
40	✓		✓		✓		✓				✓	✓		✓	✓		✓			✓		✓	✓	✓
41		✓	✓		✓		✓				✓	✓		✓	✓		✓			✓		✓	✓	✓
42		✓		✓		✓		✓			✓	✓		✓	✓		✓			✓		✓	✓	✓
43	✓		✓		✓		✓		✓			✓		✓	✓			✓	✓			✓	✓	✓
44		✓	✓		✓		✓		✓				✓	✓	✓				✓	✓		✓	✓	✓
45	✓		✓		✓		✓				✓		✓	✓				✓	✓			✓	✓	✓
46		✓	✓		✓		✓				✓		✓	✓				✓	✓			✓	✓	✓
47		✓		✓		✓		✓			✓		✓	✓				✓	✓			✓	✓	✓
48	✓		✓		✓		✓		✓			✓		✓	✓			✓		✓		✓	✓	✓
49		✓	✓		✓		✓		✓			✓		✓	✓			✓		✓		✓	✓	✓
50	✓		✓		✓		✓				✓		✓	✓				✓		✓		✓	✓	✓
51		✓	✓		✓		✓				✓		✓	✓				✓		✓		✓	✓	✓
52		✓		✓		✓		✓			✓		✓	✓				✓		✓		✓	✓	✓
53	✓		✓		✓		✓				✓	✓		✓			✓			✓		✓		✓
54		✓	✓		✓		✓				✓	✓		✓			✓			✓		✓		✓
55		✓		✓		✓		✓			✓	✓		✓	✓			✓		✓		✓		✓
56	✓		✓		✓		✓				✓		✓	✓				✓		✓		✓	✓	✓
57		✓		✓		✓		✓			✓		✓	✓				✓		✓		✓		✓
58	✓		✓		✓		✓				✓		✓	✓				✓		✓		✓	✓	✓
59		✓		✓		✓		✓			✓		✓		✓			✓		✓		✓	✓	✓
60		✓		✓		✓		✓			✓	✓		✓				✓		✓		✓	✓	✓
61	✓		✓		✓		✓				✓	✓		✓				✓		✓		✓	✓	✓
62		✓	✓		✓		✓				✓	✓		✓	✓			✓		✓		✓	✓	✓

Chez Navius, nous aidons nos clients à prendre en toute confiance des décisions éclairées concernant l'énergie, l'économie et l'environnement.

Notre panoplie unique d'outils de modélisation, de recherche et de communication nous permet d'aborder les projets avec une approche collaborative pour fournir une analyse impartiale et des conseils éclairés.

Nous joindre

Navius Research
brianne@naviusresearch.com
www.naviusresearch.com

