



Explorer les approches pour la transition du Canada vers la carboneutralité

Présentation de la stratégie à long terme du Canada à la
Convention-cadre des Nations Unies sur les changements
climatiques

Table des matières

Sommaire	2
1. L'impératif de la carboneutralité	4
2. Fondement de la carboneutralité de 2030 au Canada : Plan de réduction des émissions de 2030	10
3. Approches possibles pour atteindre la carboneutralité au Canada.....	18
4. Conclusion	48
ANNEXE: Annexe de Modélisation	49



Sommaire

Une science rigoureuse sous-tend l'inquiétude mondiale à l'égard des changements climatiques, notre compréhension du risque croissant que les changements climatiques posent pour les personnes, les entreprises, et les collectivités au Canada et partout dans le monde, et donc, le besoin de réduire les émissions à zéro. Le communiqué du G7 de 2022 comprenait un engagement pour les pays à soumettre une stratégie à long terme (SLT) de carboneutralité harmonisée à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) avant la COP27. En soumettant ce document, le Canada remplit son engagement de soumettre une stratégie à long terme de carboneutralité harmonisée à la CCNUCC.

Comme il reste moins d'une décennie avant 2030 et que les pays du monde entier se lancent dans une course à l'emploi, à l'investissement et à la sécurité pour passer rapidement à une économie à faible émissions de carbone, le Canada jette les bases pour appuyer une transition abordable, fiable, et durable d'ici 2050. Notamment en adoptant une cible de réduction d'émissions de gaz à effet de serre (GES) pour 2030 de 40 à 45 % sous les niveaux de 2005 en raison de la nouvelle contribution déterminée au niveau national (CDN).

Les données montrent que les efforts du Canada pour réduire les émissions et atteindre sa CDN de 2030 ont un impact. En 2015, les émissions du Canada étaient en forte hausse et devaient, selon les prévisions, dépasser de 12 % les niveaux de 2005 d'ici 2030. Cependant, le Canada a réussi à inverser la tendance à la hausse des émissions. Selon le Rapport d'inventaire national 2022, les émissions de gaz à effet de serre du Canada ont diminué à 672 mégatonnes (Mt) d'équivalent de dioxyde de carbone en 2020¹, ce qui représente une diminution nette de 69 Mt (ou 9,3 %) par rapport à 2005. Avec les mesures actuelles et futures en place, les émissions devraient être inférieures d'environ 40 % aux niveaux de 2005 d'ici 2030.

En juin 2021, la *Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité* (la Loi) a reçu la sanction royale, légiférant la CDN 2030 du Canada et l'objectif de carboneutralité d'ici 2050. Afin d'améliorer la transparence et la responsabilisation à mesure que le Canada s'efforce de respecter ces engagements, la Loi codifie le processus d'établissement des cibles nationales de réduction des émissions tous les cinq ans et introduit des mécanismes de planification et de production de rapports pour atteindre ces cibles jusqu'en 2050. La Loi établit également le Groupe consultatif pour la carboneutralité, qui fournira au ministre de l'Environnement et du Changement climatique des conseils indépendants pour l'atteinte de la carboneutralité d'ici 2050. En mars 2022, le Canada a publié son plan climatique—le Plan de réduction des émissions

¹ L'année 2020 a été marquée par la pandémie COVID-19, qui a coïncidé avec une diminution des émissions de 66 Mt ou 8,9 % dans de nombreux secteurs. Parmi les exemples notables, citons le secteur des transports (-27 Mt ou -12 %), principalement en raison de la diminution du nombre de kilomètres parcourus et de la baisse du trafic aérien, et le secteur de la production publique d'électricité et de chaleur (-7,4 Mt ou -11 %), en raison de la baisse de la consommation de charbon, partiellement compensée par une augmentation de la consommation de gaz naturel.



(PRE) pour 2030, qui fournit une feuille détaillée de route secteur par secteur, en déterminant les mesures et les stratégies nécessaires pour que le Canada atteigne sa cible d'émissions pour 2030 et mette en place les éléments constitutifs pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050.

Il existe de nombreuses voies potentielles que le Canada peut emprunter pour atteindre la carboneutralité. La SLT est une analyse technique qui s'appuie sur la modélisation économique pour explorer différentes approches de la transition du Canada vers des émissions nettes nulles d'ici 2050. La SLT du Canada n'est pas un plan climatique--il s'agit d'une représentation de divers scénarios futurs qui peuvent compléter les plans climatiques existants du Canada et appuyer les futurs plans de réductions des émissions qui seront élaborés en vertu de la Loi.

La SLT présente des scénarios illustratifs qui tiennent compte des principaux facteurs qui pourraient jouer un rôle important dans la réduction des émissions dans tous les secteurs de l'économie, soit l'électrification généralisée, l'utilisation élevée de carburants renouvelables et alternatifs, et l'utilisation élevée des technologies d'élimination du CO₂, telles que les technologies de captage et de stockage du carbone (CSC). Bien que ce rapport soit conforme au PRE de 2030, il n'est pas prescriptif et ne précise pas l'éventail de politiques, de mesures et de règlements qui seraient mis en œuvre. Le gouvernement du Canada continuera de collaborer avec les partenaires, les intervenants, les Canadiens et les spécialistes, comme le Groupe consultatif pour la carboneutralité, afin de définir la voie que le Canada devra suivre pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050.

Le Canada soumet ce rapport à la CCNUCC en supposant que le contenu du rapport continuera d'être mis à jour et modifié à mesure que le Canada progresse vers une économie carboneutre. Conformément à la Loi, le Canada élaborera également des plans détaillés de réduction des émissions pour chacune de ses cibles nationales de réduction des GES, notamment un plan d'ici la fin de 2045 pour son objectif de carboneutralité d'ici 2050.

Bien que la SLT soit axée sur l'atténuation des changements climatiques, l'adaptation est également un objectif clé de l'Accord de Paris. Le Canada s'est joint à d'autres parties pour s'engager à renforcer la coopération afin d'améliorer les efforts d'adaptation, de renforcer la résilience et de réduire la vulnérabilité aux changements climatiques. Les efforts en cours pour faire progresser cet engagement, étayés par de nombreuses analyses scientifiques², comprennent l'élaboration de la première Stratégie nationale d'adaptation du Canada, qui est en cours d'élaboration et qui devrait être publiée à l'automne 2022.

² [Le Canada dans un climat en changement](#)



1. L'impératif de la carboneutralité

Pour éviter les pires répercussions des changements climatiques, il est urgent de passer à une économie mondiale carboneutre. Selon le rapport du GIEC intitulé *Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, aux taux actuels, le réchauffement planétaire de 1,5 °C sera probablement atteint entre 2030 et 2052. L'atteinte de réductions importantes des émissions d'ici 2030 et de la carboneutralité d'ici 2050 est essentielle pour limiter le réchauffement à 1,5 °C et éviter les risques graves liés au climat. Les impacts du changement climatique sont particulièrement forts au Canada, car celui-ci se réchauffe deux fois plus vite que la moyenne mondiale, et le Nord canadien se réchauffe trois fois plus vite. Les effets des changements climatiques généralisés sont déjà évidents dans de nombreuses régions du Canada et devraient s'intensifier à l'avenir, y compris des phénomènes météorologiques plus fréquentes et plus sévères.

En réponse aux preuves scientifiques sur la nécessité d'agir, ainsi qu'aux opportunités économiques importantes³ qu'offre une économie à faibles émissions de carbone, l'élan pour une action climatique mondiale accrue continue de s'accroître entre les gouvernements, les entreprises et les particuliers et de plus en plus de pays s'engagent à atteindre la carboneutralité pour maintenir le réchauffement planétaire en deçà de 1,5 °C. Pour faire sa part, le Canada s'est joint à plus de 130 pays, dont tous les autres pays du G7 et G20, et à une foule de municipalités, de communautés autochtones et d'entreprises canadiennes qui se sont engagées à atteindre la carboneutralité d'ici 2050.

Que signifie la carboneutralité?

La carboneutralité signifie que toutes les émissions de GES rejetées dans l'atmosphère sont compensées par l'élimination du dioxyde de carbone. Les suppressions peuvent comprendre des puits de carbone naturels comme les terres humides et les forêts, ou la séquestration au moyen de technologies émergentes comme le captage et le stockage du carbone (CSC).

Conscient de l'importance de jeter les bases de la carboneutralité, le Canada a adopté pour 2030 une cible de réduction des émissions de 40 à 45 % par rapport aux niveaux de 2005 à titre de contribution déterminée au niveau national (CDN), et a annoncé de nouveaux investissements importants et de nouvelles mesures pour aider à atteindre ce résultat. Le Canada a également inscrit ses cibles climatiques de 2030 et de 2050 dans une loi fédérale, établissant des structures de responsabilisation robustes, y compris des obligations de rendre compte, pour appuyer l'atteinte de ces objectifs.

Les mesures prises à ce jour pour lutter contre les changements climatiques placent le Canada sur la voie de la carboneutralité d'ici 2050 et de l'atteinte des objectifs de

³ Selon [Clean Energy Canada](#), le PIB du secteur de l'énergie propre devrait augmenter de 58 % d'ici 2030 (le secteur des combustibles fossiles ne connaîtra qu'une croissance de 9 %) et représentera 29 % du PIB énergétique total du Canada, comparativement à 22 % en 2020. L'activité économique et l'emploi dans l'industrie canadienne des technologies propres devraient augmenter d'environ 50 % au cours des huit prochaines années et, d'ici 2025, la contribution du secteur au PIB du Canada devrait passer de 26 milliards de dollars en 2016 à 80 milliards de dollars.



l'Accord de Paris, tout en rendant l'économie canadienne plus forte et plus concurrentielle. La décarbonisation de l'économie canadienne offre de nombreuses nouvelles possibilités dans les industries émergentes des technologies propres. Par exemple, l'Agence internationale de l'énergie estime que les technologies émergentes pourraient être nécessaires pour jusqu'à la moitié des réductions d'émissions nécessaires afin d'atteindre la carboneutralité d'ici 2050.

La transition présente également des possibilités d'accroître la compétitivité des secteurs traditionnels dans une économie mondiale décarbonisée, et le Canada est bien placé pour tirer parti de ces possibilités grâce à son expertise actuelle dans le secteur des ressources naturelles. La transition vers un avenir plus propre apportera de nouvelles opportunités dynamiques pour les travailleurs, mais aussi des changements. Il sera essentiel d'adopter une approche centrée sur les personnes, de veiller à ce que les travailleurs disposent de compétences, de la formation et du soutien dont ils ont besoin pour saisir de nouvelles occasions, tout comme il sera essentiel de veiller à ce que les groupes et communautés sous-représentés et peuples autochtones du Canada soient inclus dans l'élaboration des plans de transition. De plus, il est important de soutenir les opportunités pour les Canadiens qui ont traditionnellement fait face à des obstacles à l'emploi dans le secteur des ressources, tels que les femmes, les Canadiens racialisés, les personnes handicapées et la communauté 2SLGBTQ+.

Il n'existe pas de solution universelle pour atteindre la carboneutralité. Les différentes régions, les secteurs et les groupes auront leurs propres voies de transition qui reflètent leurs circonstances uniques. L'élaboration de voies concrètes, justes et réalisables vers la carboneutralité qui ne laissent personne pour compte nécessitera un engagement et une collaboration continus avec les provinces, les territoires, les peuples autochtones, l'industrie, les intervenants et la société civile, en tenant compte des commentaires d'experts indépendants, des dernières données scientifiques et des connaissances autochtones.



Les connaissances autochtones et la *Déclaration des Nations Unies sur les droits des peuples autochtones*

Les peuples autochtones du Canada ont été au premier plan des répercussions des changements climatiques. De nombreux dirigeants autochtones ont insisté sur la nécessité de prendre des mesures pour réduire la pollution, s'adapter aux répercussions des changements climatiques et améliorer la façon dont l'environnement naturel est respecté et protégé. Ce faisant, le leadership et le savoir autochtones jouent un rôle important dans l'atteinte des objectifs climatiques du Canada, y compris l'atteinte de la carboneutralité d'ici 2050. Le gouvernement du Canada appuie la *Déclaration des Nations Unies sur les droits des peuples autochtones* (Déclaration des NU), de même que les approches et les façons de faire autochtones, tout en reconnaissant que les systèmes de connaissances autochtones font partie intégrante de l'élaboration des politiques, des programmes et de la prise de décisions. Le Canada s'est engagé à améliorer le respect de la Déclaration des Nations Unies dans toutes ses politiques et tous ses programmes et à travailler avec ses partenaires autochtones pour mieux appuyer leurs priorités en matière de climat. La *Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité* exige également que le Canada tienne compte des connaissances autochtones lorsqu'il fixe des cibles de réduction des émissions, ainsi que de la Déclaration des Nations Unies dans l'établissement de plans de réduction des émissions.



Rôle de la science dans l'atteinte de la carboneutralité d'ici 2050

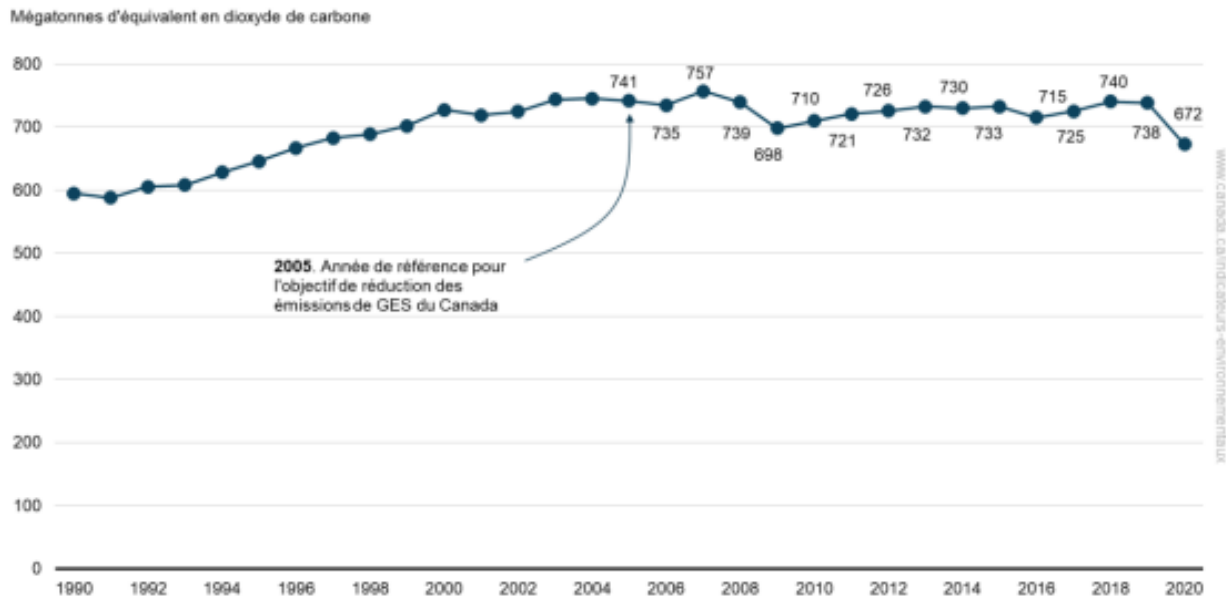
Il est essentiel d'acquérir des connaissances scientifiques et de refléter une nouvelle compréhension pour orienter les mesures ambitieuses, mesurer les progrès et peaufiner les mesures climatiques. Environnement et Changement climatique Canada dirige l'élaboration du premier Plan national des sciences et des connaissances sur le changement climatique du Canada, qui sera publié à la fin de 2022. Le Plan définira les activités prioritaires de recherche scientifique et de synthèse des connaissances pour lesquelles des investissements produiront des résultats au cours des cinq à dix prochaines années. Ceux-ci permettront également de réaliser des progrès supplémentaires à l'égard des défis scientifiques à long terme liés à la compréhension de la façon dont le réchauffement futur affectera les améliorations d'infrastructure planifiée et l'énergie renouvelable, les solutions technologiques et axées sur la nature, et mettront l'accent sur les défis et les priorités scientifiques afin de guider les changements transformationnels nécessaires pour atteindre les objectifs de 2050. Les progrès scientifiques réalisés au Canada permettent également d'améliorer la capacité de modélisation du climat, ce qui permettra une simulation détaillée des sources et des puits de carbone dans les écosystèmes anthropiques et naturels. Cela reflète la capacité scientifique croissante de modéliser le cycle du carbone et les impacts sur les ressources en eau pour comprendre l'ampleur potentielle des puits de carbone dans la planification de l'atténuation et la durabilité dans les opérations du secteur des ressources naturelles. Le développement des observations des GES atmosphériques crée des opportunités de compléter le Rapport d'inventaire national avec les améliorations continues de l'estimation des émissions, de leurs niveaux, de leur localisation et de leur évolution dans le temps au Canada. Pour renforcer la science qui sous-tend la déclaration des émissions de GES dans le cadre de la *Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité*, il est possible d'harmoniser l'investissement et la capacité dans la recherche et la surveillance, de mobiliser l'information disponible sur les sources d'émissions, les puits, le stockage de captage, et le rythme des réductions au Canada, proportionnel à l'ambition des cibles. L'amélioration de l'effort stratégique coordonné à l'échelle nationale continuera de tirer avantage de la science actuelle et future.

Le profil actuel des émissions et les tendances historiques du Canada fournissent des indications sur la situation des émissions du Canada d'ici 2030 et 2050. En 2015, les émissions du Canada ont grimpé en flèche et étaient projetées à 12 % au-dessus des niveaux de 2005 d'ici 2030. Cependant, le Canada a réussi à inverser la tendance à la hausse des émissions. Selon le Rapport d'inventaire national de 2022, les émissions de gaz à effet de serre du Canada ont diminué à 672 mégatonnes d'équivalent de dioxyde de carbone en 2020⁴, ce qui représente une diminution nette de 69 Mt (ou 9,3 %) par rapport à 2005, et avec les mesures actuelles et futures, selon les projections, ils seront inférieurs d'environ 40 % aux niveaux de 2005 d'ici 2030.

⁴ L'année 2020 a été marquée par la pandémie de COVID-19, qui a coïncidé avec une diminution des émissions de 66 Mt, ou 8,9 %, dans de nombreux secteurs. Parmi les exemples dignes de mention, notons le transport (-27 Mt ou -12 %), en grande partie en raison de la diminution du nombre de kilomètres parcourus et du trafic aérien, et la production d'électricité et de chaleur dans le secteur public (-7,4 Mt ou -11 %) en raison de la diminution de la consommation de charbon, partiellement compensée par une augmentation de la consommation de gaz naturel.



Émissions de gaz à effet de serre, Canada, 1990 à 2020



Source : RIN 2022

Alors que le Canada s'efforce d'atteindre sa CDN de 2030, il explore également des voies pour soutenir la réduction des émissions, la croissance propre et un avenir de carboneutralité juste et inclusif. La SLT du Canada s'appuie sur la *Stratégie visant l'horizon du milieu du siècle* de 2016, réaffirme l'engagement du Canada à atteindre la carboneutralité d'ici 2050 et explore les approches potentielles pour y arriver.

Stratégie du Canada pour le milieu du siècle de 2016

En novembre 2016, le Canada a présenté sa *Stratégie pour le milieu du siècle* à la CCNUCC, ce qui en fait l'un des premiers pays à formuler ses considérations à long terme en matière de décarbonisation en profondeur dans le cadre de l'Accord de Paris. Guidée par la mobilisation d'experts canadiens, la *Stratégie pour le milieu du siècle* décrit diverses voies normatives non politiques vers une économie à faibles émissions de carbone d'ici 2050, tout en reconnaissant les secteurs où la réduction des émissions sera plus difficile. Aux fins de la *Stratégie pour le milieu du siècle*, le Canada a examiné diverses façons d'atteindre une réduction de 80 % des émissions de GES par rapport aux niveaux de 2005. La *Stratégie pour le milieu du siècle* a permis de déterminer les composantes de base clés qui demeurent pertinentes dans le contexte de la carboneutralité, notamment :

- l'électrification des applications d'utilisation finale et la production d'électricité propre ;
- l'efficacité et la gestion de la demande énergétiques;
- la réduction des gaz à effet de serre autres que le dioxyde de carbone (GES), comme le méthane et les hydrofluorocarbures;
- la séquestration par les forêts et les terres du Canada;
- le rôle de l'innovation, l'intensification de la recherche, du développement et du déploiement (R-D-D) et l'investissement du secteur privé pour faciliter la transition vers une économie à faibles émissions de carbone.



En tant que jalon clé pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050, le chapitre 2 de ce document présente l'approche actuelle du Canada pour atteindre sa CDN améliorée pour 2030, y compris les mesures et les stratégies récemment annoncées dans le PRE pour 2030 du Canada. Le chapitre 3 examine quatre scénarios modélisés possibles pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050, qui reflètent trois catalyseurs qui influenceront chaque secteur de l'économie : l'électrification, l'utilisation élevée de carburants renouvelables et alternatifs, et l'utilisation élevée des technologies d'élimination du CO₂. Ces scénarios sont illustratifs, reflètent la compréhension actuelle du Canada des capacités et des progrès technologiques, et mettront l'accent sur les répercussions sectorielles des différentes trajectoires d'émissions. Le chapitre 3 souligne aussi les mécanismes en place pour veiller à ce que le Canada demeure transparent et responsable dans ses efforts pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050.

Communication des progrès du Canada en matière de changements climatiques : la SLT du Canada par rapport aux rapports biennaux

La communication des progrès du Canada vers l'atteinte de ses objectifs climatiques est importante pour démontrer une transparence pour appuyer les ambitions mondiales en vertu de l'Accord de Paris. La SLT du Canada présente des approches illustratives pour 2050 fondées sur des scénarios modélisés, et s'appuie sur la trajectoire projetée actuelle du Canada jusqu'en 2030 grâce aux mesures décrites dans le PRE pour 2030. Cette approche est préconisée par l'Accord de Paris à l'article 4.19. Des mises à jour sur les tendances et les projections des émissions du Canada, des renseignements détaillés sur les politiques et les mesures existantes qui soutiennent l'atténuation des changements climatiques et des mises à jour des inventaires nationaux de GES, sont communiquées périodiquement par le biais des rapports biennaux du Canada sur les changements climatiques et remplissent les exigences de déclaration du Canada à la CCNUCC en tant que signataire de l'Accord de Paris. Le Canada soumettra son prochain rapport biennal à la CCNUCC en décembre 2022.



2. Fondement de la carboneutralité de 2030 au Canada : Plan de réduction des émissions de 2030

Mesures prises à ce jour

Le Canada dispose d'une base solide pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050. Les efforts déployés à ce jour dans l'ensemble des plans climatiques du Canada depuis 2016, incluant plus de 100 mesures climatiques et des investissements de 120 milliards de dollars dans la lutte contre les changements climatiques engagés au cours de cette période, et l'action collective de tous les ordres de gouvernement, des peuples autochtones, de l'industrie et de la société civile a permis au Canada d'infléchir la courbe de ses émissions vers le bas. La section suivante présente les principaux domaines de progrès.

Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques

Le tout premier plan national de lutte contre les changements climatiques du Canada, le [Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques \(Cadre pancanadien\)](#), a été adopté en 2016, juste après la publication de la [Stratégie pour le milieu du siècle](#). Le Cadre pancanadien a été élaboré en collaboration avec les provinces et les territoires du Canada et en consultation avec les organisations et les représentants autochtones nationaux, les intervenants de l'industrie et les Canadiens. Le Cadre pancanadien comprend plus de 50 mesures conjointes et individuelles, et il a introduit des piliers clés de l'approche du Canada en matière de réduction des émissions, comme la tarification de la pollution par le carbone.

Grâce aux seules mesures du Cadre pancanadien, les émissions du Canada devraient être inférieures de 19 % aux niveaux de 2005 d'ici 2030 (diminution de 227 Mt). Les mesures du Cadre pancanadien demeurent au cœur des efforts déployés par le Canada pour réduire les émissions d'ici 2030, aider à renforcer la résilience à l'échelle du pays et soutenir le développement des technologies propres nécessaires à une croissance économique propre. Les progrès de la mise en œuvre de ces mesures ont fait l'objet d'un rapport annuel depuis la diffusion du Cadre pancanadien au moyen de [rapports de synthèse](#).

Un environnement sain et une économie saine : le Plan climatique renforcé du Canada.

En décembre 2020, le Canada a présenté un plan climatique fédéral renforcé, [Un environnement sain et une économie saine](#). Ce plan climatique renforcé présentait une série d'engagements qui s'appuient sur les mesures du Cadre pancanadien visant à réduire les émissions à 31 pour cent sous les niveaux de 2005 d'ici 2030.

Le plan comprend également des engagements visant à rendre les opérations gouvernementales du Canada plus écologiques, à rendre le Canada plus résilient face



aux changements climatiques, à établir des partenariats avec les peuples autochtones du Canada ainsi qu'avec les gouvernements provinciaux et territoriaux, et à collaborer avec des partenaires internationaux.

Contribution déterminée au niveau national

En juillet 2021, peu après l'adoption de la [Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité](#), le Canada a présenté à la CCNUCC sa CDN renforcée de 40 % à 45 % sous les niveaux de 2005 d'ici 2030. Cette cible renforcée reflète les meilleures données scientifiques disponibles, et est conforme aux résultats d'un sondage mené auprès des Canadiens, dans lequel la grande majorité des répondants ont demandé une augmentation de l'ambition climatique pour 2030. La présentation de la CDN renforcée du Canada reflète les commentaires reçus des gouvernements provinciaux et territoriaux, ainsi que des Premières Nations, des Inuits et de la Nation métisse. Le Canada est l'un des premiers pays à inclure des commentaires substantiels des organismes infranationaux et des peuples autochtones dans sa présentation à la CDN.

Plan de réduction des émissions pour 2030 : Un air pur et une économie forte

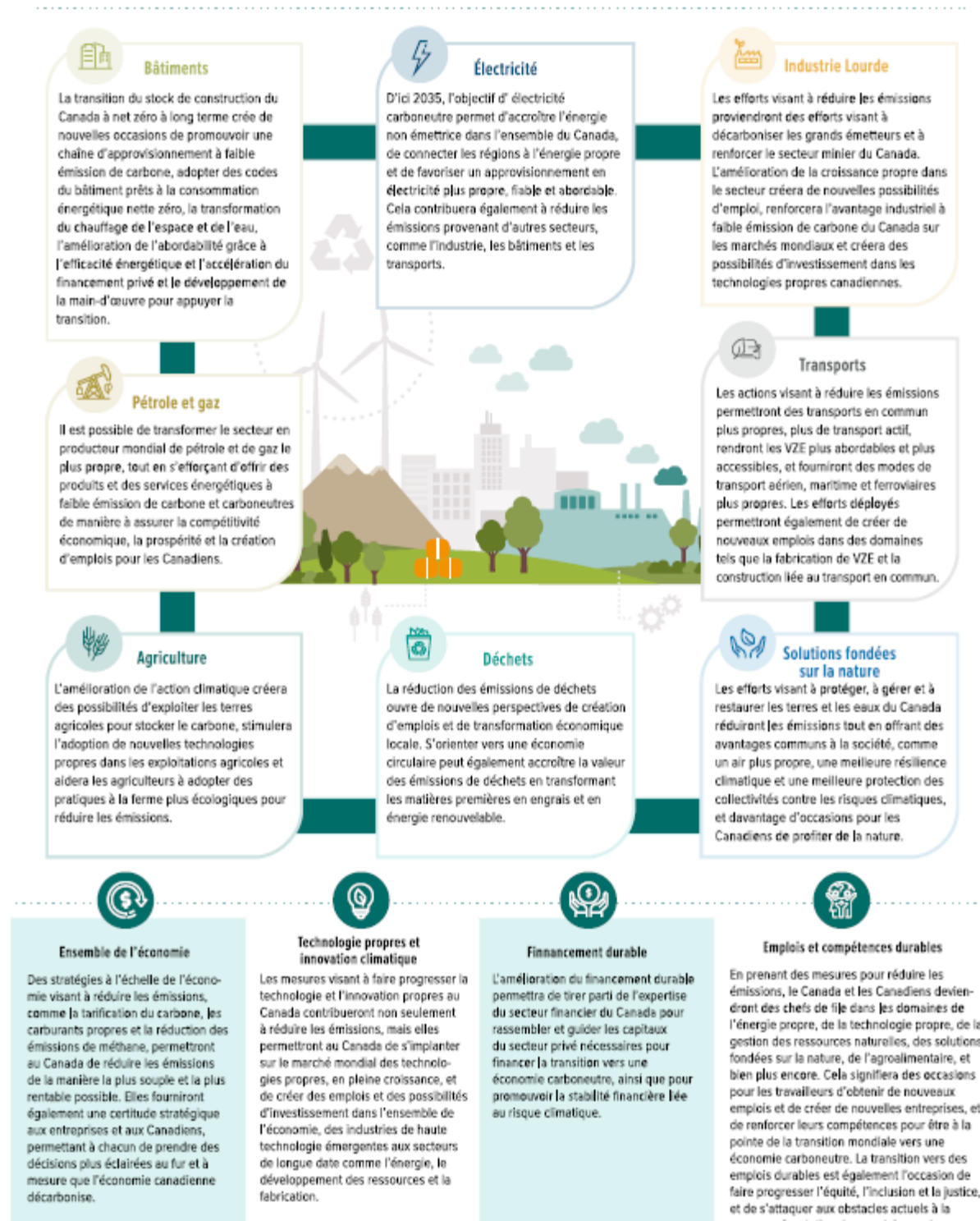
Le [Plan de réduction des émissions pour 2030 : Un air pur et une économie forte](#), sert de feuille de route qui décrit la voie à suivre par secteur pour que le Canada atteigne sa cible de réduction des émissions de 40% à 45 % sous les niveaux de 2005 d'ici 2030 et jette les bases de la carboneutralité d'ici 2050.

Le PRE pour 2030 tient compte des commentaires de plus de 30 000 Canadiens, des provinces et territoires, des peuples autochtones et du Groupe consultatif pour la carboneutralité. Il est conçu pour être évolutif et permettra de cerner et de saisir de nouvelles occasions à mesure que les gouvernements, les entreprises, les organismes sans but lucratif et les collectivités de partout au Canada s'efforceront d'atteindre la cible de 2030.

La section suivante résume l'approche adoptée par le Canada pour respecter sa CDN de 2030, telle que décrite dans le PRE de 2030.



PRE 2030 : CADRE DE DÉCARBONISATION DU CANADA



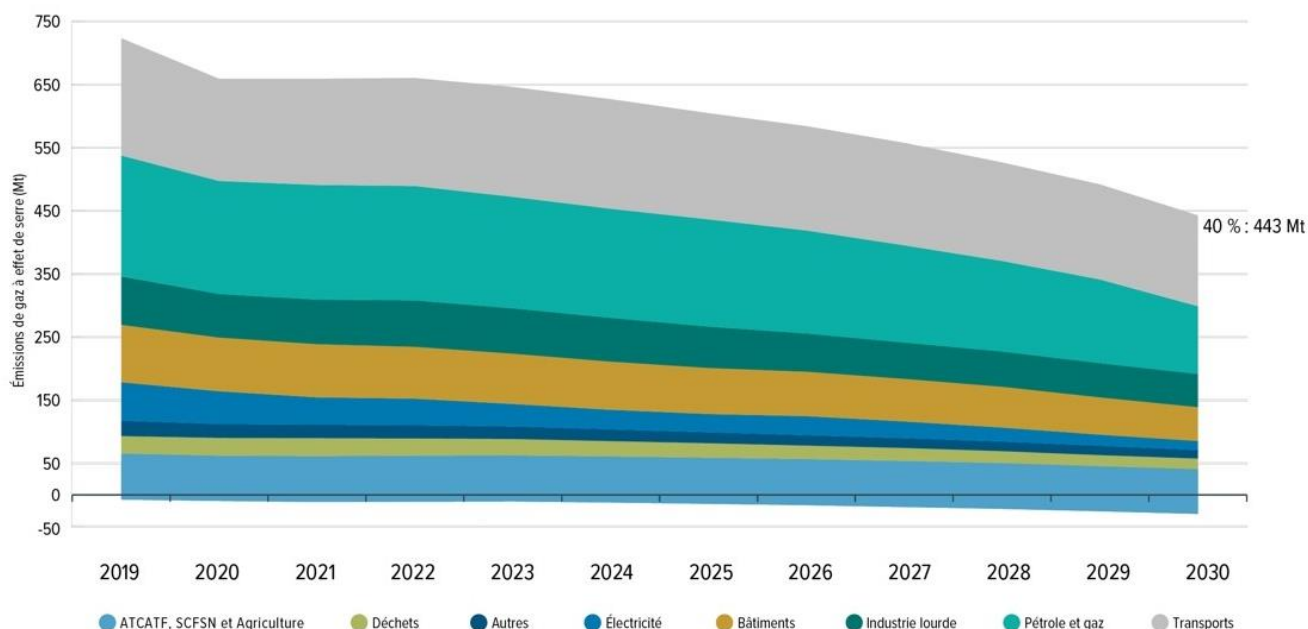


Projections du Canada vers 2030

Ventilée par secteur, la trajectoire du Canada jusqu'en 2030 est fondée sur la compréhension actuelle du potentiel de réduction des émissions de chaque secteur d'ici 2030. Compte tenu des interactions et des interdépendances économiques au sein des secteurs et entre ceux-ci, les endroits précis de réductions potentielles des émissions pourraient changer à l'avenir à mesure que le Canada se décarbonisera.

La trajectoire du Canada pour 2030 indique les secteurs où les émissions peuvent potentiellement être réduites afin de réaliser des progrès supplémentaires. Il est important de noter que les voies ne sont pas des cibles sectorielles, mais les contributions sectorielles prévues. Les réductions d'émissions que chaque secteur contribuera en fin de compte varieront probablement au fil du temps à mesure que le Canada réagira aux changements réels du monde, comme la mise en œuvre de ses plans climatiques par d'autres pays et les changements de la demande mondiale de pétrole et de gaz naturel.

Trajectoire vers 2030



Les réductions potentielles présentées pour chaque secteur (voir le graphique précédent et le tableau ci-dessous) représentent une seule voie possible vers l'atteinte de la cible de 2030, réalisée à l'aide d'une approche de modélisation qui considère la façon la plus efficace sur le plan économique d'atteindre la limite inférieure de la cible de 2030 du Canada. Cela permet de comprendre comment les réductions d'émissions pourraient être réparties entre les secteurs. D'autres facteurs importants, comme la faisabilité opérationnelle, la disponibilité de la main-d'œuvre et l'infrastructure habilitante qui ne peuvent pas être modélisées auront également une incidence et pourraient limiter la trajectoire du Canada par secteur jusqu'en 2030.



Pendant la même période, l'ambition climatique accrue des provinces et territoires, des peuples autochtones, des municipalités, de l'industrie, du secteur financier et d'autres intervenants peut entraîner d'autres réductions, et ainsi permettre au Canada d'atteindre et de dépasser la limite supérieure de sa cible de 2030 et de jeter les bases de la carboneutralité d'ici 2050.

Tableau 1 : Contributions sectorielles prévues par le PRE 2030⁵

Secteur	Où nous en étions en 2005 (Mt)	Où nous en étions en 2019 (Mt)	Où nous pourrions être en 2030 (Mt)	Réductions en pourcentage par rapport aux niveaux de 2005*
Bâtiments	84	91	53	-37 %
Électricité	118	61	14	-88 %
Industrie lourde	87	77	52	-39 %
Pétrole et gaz	160	191	110	-31 %
Transport	160	186	143	-11 %
Agriculture**	72	73	71	-1 %
Déchets et autres	57	51	29	-49 %
Affectation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (ATCATF), Solutions climatiques naturelles	-	-	-30	-
Total*	739	730	443	-40 %

*Les chiffres ayant été arrondis, leur somme peut ne pas correspondre au total indiqué.

** La réduction de 30 Mt d'émissions grâce à l'affectation des terres, du changement d'affectation des terres et de la foresterie (ATCATF) et aux solutions climatiques naturelles (SCN) comprend les émissions du secteur agricole. Les émissions attribuées au secteur agricole sont réparties entre la catégorie de l'agriculture et la catégorie de l'ATCATF. Les émissions du secteur agricole proviennent de la production de cultures, de la production animale et de l'utilisation de combustibles à la ferme, tandis qu'une partie importante de la catégorie de l'ATCATF peut être attribuée aux terres cultivées agricoles, ce qui démontre l'importante contribution du secteur à l'élimination des terres cultivées.

Ces chiffres indicatifs ont été établis sur la base des meilleures informations disponibles à ce moment précis, y compris les données sur les émissions du [Rapport d'inventaire national](#) 2021 du Canada. Le Canada continuera de peaufiner et de mettre à jour les projections au moyen de futurs rapports d'étape exigés en vertu de la *Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité*, ainsi que par l'entremise des rapports de la CCNUCC. Le Canada soumettra son cinquième rapport biennal à la CCNUCC d'ici la date limite du 31 décembre 2022.

Principales stratégies par secteur

Pour réaliser les contributions sectorielles décrites ci-dessus, le PRE pour 2030 décrit les diverses mesures et stratégies qui sont mises en œuvre dans chaque secteur afin d'atteindre la cible de 2030 du Canada. Ces mesures sont résumées ci-dessous.



Ensemble de l'économie

Les mesures transversales offrent une certitude stratégique dans l'ensemble de l'économie et sont à la base du cheminement du Canada vers 2030.

Augmenter la tarification de la pollution par le carbone chaque année jusqu'en

⁵ Pour en savoir plus sur la modélisation du PRE, veuillez consulter le chapitre 3.



2030 et explorer des approches pour fournir plus de certitude quant à la trajectoire du prix de la pollution par le carbone jusqu'en 2030, veiller à ce que les systèmes provinciaux et territoriaux de tarification de la pollution par le carbone respectent les critères de référence fédéraux, faire progresser les carburants propres, réduire le méthane dans l'ensemble de l'économie et mettre en place un Fonds pour une économie à faibles émissions de carbone amélioré sont tous des éléments essentiels de l'approche climatique du Canada à l'échelle de l'économie.



Bâtiments

Un effort pangouvernemental et économique axé sur la réglementation, les politiques, l'investissement et les leviers d'innovation stimulera la décarbonisation du secteur du bâtiment. À cette fin, le Canada élabore une stratégie nationale pour les bâtiments carboneutres et résilients, la Stratégie canadienne pour les bâtiments verts et aide les collectivités à moderniser et à adapter les maisons et les bâtiments, y compris les logements abordables, dans le cadre du programme Prêt canadien pour des maisons plus vertes.



Électricité

Des efforts considérables ont été déployés pour décarboniser le réseau électrique du Canada, qui est déjà non émetteur à 82 %. La mise en place d'un réseau d'électricité carboneutre d'ici 2035 sera essentielle pour alimenter l'économie canadienne au moyen d'énergie propre. Des mesures clés continueront d'accroître l'approvisionnement en énergie propre et la construction d'interconnexions tout en maintenant la fiabilité et l'abordabilité.



Industrie lourde

Le Canada s'appuiera sur les progrès réalisés pour décarboniser son industrie lourde en élargissant la Norme ISO 50001 pour les systèmes de gestion de l'énergie, en soutenant les rénovations pour les projets de petite à moyenne envergure, et en introduisant une stratégie d'achat propre pour les investissements fédéraux afin de donner la priorité à l'utilisation de produits à faible teneur en carbone fabriqués au Canada dans les projets d'infrastructure canadiens.



Pétrole et gaz

Le Canada jumellera des mesures de réduction des émissions du secteur pétrolier et gazier avec un éventail de politiques et d'investissements à l'appui, y compris pour les travailleurs. Cela comprend un plafond sur les émissions du secteur pétrolier et gazier conçu en collaboration avec les partenaires et les parties prenantes, d'élimination progressive des combustibles fossiles et élaborer un crédit d'impôt à l'investissement pour le crédit d'impôt à l'investissement pour le captage, l'utilisation et le stockage du carbone (CUSC). La réduction des émissions de méthane dans le secteur sera également essentielle à l'atteinte de la cible de 2030. À la COP26, le Canada s'est joint à l'Engagement mondial sur le méthane, qui vise à réduire les émissions anthropiques mondiales de méthane dans tous les secteurs d'au moins 30 % d'ici 2030, par rapport aux niveaux de

2020 et a publié une [stratégie](#) pour atteindre cet objectif. De plus, le Canada a été le premier pays à s'engager à réduire davantage les émissions de méthane provenant des activités pétrolières et gazières d'au moins 75 % par rapport aux niveaux de 2012 d'ici 2030, comme l'a demandé l'Agence internationale de l'énergie.



Transport

Des efforts sont en cours pour rendre les véhicules zéro émission (VZE) plus abordables et accessibles pour tous les Canadiens grâce à des remises et des investissements dans l'infrastructure de chargement. Afin d'accélérer la transition vers les VZE, le Canada élabore un objectif de vente obligatoire selon lequel au moins 60 % de toutes les nouvelles ventes de véhicules légers ne produiront aucune émission d'ici 2030, comme mesure provisoire pour atteindre 100 % d'ici 2035. Quant aux véhicules moyens et lourds (VML), le Canada élaborera un règlement exigeant que 100 % des ventes de véhicules moyens et lourds soient des VZE d'ici 2040 pour un sous-ensemble de types de véhicules fondé sur la faisabilité et avec des exigences de ventes réglementées provisoires pour 2030. Le Canada investit également dans le transport en commun et le transport actif et poursuit ses efforts pour décarboniser le transport aérien, ferroviaire et maritime.



Agriculture

Compte tenu du rôle important que joue le secteur agricole du Canada dans la lutte contre les changements climatiques et dans le contexte d'une demande mondiale croissante de nourriture, les mesures sont axées sur l'augmentation de la capacité des terres agricoles à stocker le carbone et sur l'exploration de divers outils pour encourager de nouvelles réductions des émissions dans le secteur agricole. Cela comprend d'autres investissements pour appuyer l'adoption de technologies propres et des solutions climatiques naturelles pour séquestrer le carbone et générer d'autres avantages environnementaux, ainsi que des efforts pour atteindre une cible nationale de réduction des émissions liées aux engrais de 30 % sous les niveaux de 2005 d'ici 2030.



Déchets et autres

Malgré sa faible empreinte de GES, le Canada explore des façons de réduire davantage les émissions dans le secteur des déchets en appuyant l'élaboration de projets d'immobilisations liés aux déchets et à l'eau, en faisant la promotion d'une approche canadienne de l'économie circulaire et en explorant les possibilités de réduire le gaspillage alimentaire.



Solutions climatiques naturelles

Les solutions climatiques naturelles ont un rôle important à jouer dans l'atteinte de l'objectif du Canada pour 2030 et procurent également d'importants avantages pour la société. L'augmentation du financement du Fonds pour des solutions climatiques naturelles et la protection des terres et océans qui stockent et séquestrent le carbone sont deux priorités clés pour atteindre la cible de 2030.



Technologies propres

Le Canada veille à ce que son écosystème de technologies propres appuie l'atteinte de ses objectifs climatiques pour 2030 et 2050. Le Canada explore sa trajectoire en matière d'innovation climatique grâce à des efforts comme l'ambition réglementaire, les investissements dans le déploiement de technologies propres, l'approvisionnement à faibles émissions de carbone et plus encore. Pour ce faire, des mesures comme le renforcement des investissements dans la R-D-D pour les technologies émergentes carboneutres seront prises et de nouveaux crédits d'impôt pour les technologies propres et les technologies à zéro émission seront mis en place.



Compétences et main-d'œuvre

Le Canada reconnaît qu'à mesure que les mesures d'atténuation deviendront plus rigoureuses, la nécessité de soutenir les travailleurs et les collectivités s'accroîtra. Des efforts tels que la mise en œuvre de la loi sur la transition équitable, l'investissement dans les compétences et la formation, et la création de possibilités pour les personnes et les communautés sous-représentées de se joindre à la main-d'œuvre du secteur de l'énergie propre sont des priorités.



Financement durable

La décarbonisation exige une transformation du système financier du Canada afin qu'il soit compatible avec la carboneutralité et pour mobiliser davantage de financements du secteur privé. Les efforts visant à faire progresser la finance durable au Canada, en intégrant les facteurs environnementaux, sociaux et de gouvernance dans la prise de décisions financières, seront importants pour atteindre les objectifs climatiques du Canada pour 2030 et 2050.

Partenariats et collaboration

Les partenariats et la collaboration avec les provinces, les territoires, les peuples autochtones, l'industrie, les pairs internationaux et les administrations locales sont essentiels à l'atteinte de la cible du Canada pour 2030. Au Canada, l'environnement est un domaine de compétence partagée entre les gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux, et les municipalités ont une influence sur environ 50 % des émissions de GES du Canada. Les autres niveaux de gouvernement ont donc un rôle important à jouer lorsqu'il s'agit de réduire les émissions dans des secteurs clés tels que l'électricité et l'agriculture. De plus, comme le stipule la *Déclaration des Nations Unies sur les droits des peuples autochtones*, d'ententes sur l'autonomie gouvernementale, de traités historiques et modernes, les peuples autochtones ont des droits sur leurs terres, leurs territoires et leurs ressources. Les provinces et territoires, et, dans certains cas, les peuples autochtones, sont responsables des leviers stratégiques pour les principales sources d'émissions et plusieurs provinces, territoires et collectivités autochtones ont pris des mesures pour réduire les émissions sur leur territoire.

En outre, bien qu'il reste du travail à faire pour veiller à ce que le leadership autochtone en matière de climat soit pleinement intégré dans l'action climatique du Canada, le Canada s'est engagé à améliorer le respect de la *Déclaration des Nations*



Unies sur les droits des peuples autochtones dans toutes ses politiques et tous ses programmes et à travailler avec ses partenaires autochtones pour mieux appuyer leurs priorités en matière de climat.

Le Canada s'est également engagé à lutter contre les changements climatiques en partenariat avec ses pairs internationaux, notamment dans le cadre du G7, du G20, des Nations Unies et d'autres forums internationaux et relations bilatérales

Plan de réduction des émissions pour 2030 et Stratégie à long terme du Canada

Bien que ces deux documents aident le Canada à atteindre ses objectifs climatiques, le Plan de réduction des émissions de 2030 et la Stratégie à long terme du Canada sont des exercices uniques qui ont des objectifs différents.

Le PRE de 2030 est un plan détaillé de lutte contre les changements climatiques qui permettra au Canada d'atteindre sa contribution déterminée au niveau national de 40 % à 45 % sous les niveaux de 2005 d'ici 2030. Les projections du PRE de 2030 sont fondées sur ces mesures et stratégies détaillées et orienteront la réduction des émissions dans chaque secteur afin d'atteindre la cible de 2030.

D'autre part, la SLT du Canada est un document exploratoire qui complète le PRE de 2030. La SLT du Canada utilise la modélisation économique pour explorer divers scénarios afin de déterminer à quoi pourrait ressembler un Canada carboneutre en 2050. La voie vers la carboneutralité deviendra plus claire au fur et à mesure que le Canada recevra des conseils supplémentaires des spécialistes sur les voies de transition (notamment du Groupe consultatif pour la carboneutralité) et qu'il respectera les jalons clés établis dans la *Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité*. Entre-temps, la SLT du Canada fournit un aperçu des implications de différents scénarios d'émissions nettes nulles pour le Canada, sur la base des meilleures informations disponibles aujourd'hui.

3. Approches possibles pour atteindre la carboneutralité au Canada

3.1 Éléments clés de la carboneutralité

Tous les secteurs de l'économie canadienne auront un rôle à jouer dans la transition vers la carboneutralité. Par exemple, de nombreux secteurs devront accroître l'efficacité énergétique pour produire les mêmes extrants avec moins d'énergie, produire plus d'électricité et une électricité plus propre, et il sera nécessaire d'améliorer l'infrastructure de transport d'électricité pour soutenir une électrification généralisée. De plus, la façon dont le Canada transporte les gens et les biens devra être décarbonisée, grâce à l'électrification, comme les véhicules électriques, ou aux carburants de remplacement, comme l'hydrogène. Les procédés industriels qui dépendent actuellement des technologies émettrices se transformeront, soit par des procédés de remplacement, soit par de nouvelles technologies. Dans un avenir carboneutre, le Canada devra également exploiter la capacité de la nature à capter et à stocker le carbone en protégeant, en gérant et en restaurant de façon durable ses terres et ses océans. Il sera également essentiel de travailler avec des partenaires internationaux pour réduire les émissions. Cela peut inclure l'achat d'unités d'atténuation transférés à l'échelle internationale, comme décrits à l'article 6 de

l'Accord de Paris. Bien que le rôle précis que chacun de ces éléments jouera ne soit pas clair pour le moment, ils feront tous partie intégrante de l'atteinte de la carboneutralité au Canada.

Peu importe les technologies et les approches particulières que chaque secteur économique utilise pour atteindre la carboneutralité, certains éléments de la transition seront transversaux à tous les secteurs. Les voici :



Donner la priorité aux gens

La transition vers une économie carboneutre aura des répercussions sur les régions, les collectivités et les secteurs de l'économie. La voie du Canada vers la carboneutralité devrait promouvoir l'équité, l'inclusion et le bien-être pour tous. Le Canada est déterminé à veiller à ce que les travailleurs aient les compétences et les possibilités nécessaires pour prospérer dans un monde carboneutre, peu importe qui ils sont, où ils vivent ou ce qu'ils font.



Secteur des sciences et de la recherche

Il est essentiel de développer les connaissances scientifiques et de refléter une nouvelle compréhension pour éclairer les actions ambitieuses, mesurer les progrès et affiner les actions climatiques. La science et la recherche joueront un rôle important dans la mise au point de nouvelles technologies propres pour aider le Canada et le monde à réduire les émissions et à mieux comprendre les répercussions des changements climatiques.



Partenariats

Le gouvernement du Canada ne peut atteindre la carboneutralité à lui seul. Les partenariats avec les provinces et les territoires, les villes, l'industrie, les travailleurs, les communautés, les investisseurs, les entrepreneurs, les peuples autochtones et les partenaires internationaux seront essentiels.



Connaissances autochtones

Le Canada appuie la *Déclaration des Nations Unies sur les droits des peuples autochtones* (Déclaration des Nations Unies) et reconnaît que les systèmes de connaissances autochtones et les façons de faire doivent être une pierre angulaire de la politique canadienne sur le climat. Les systèmes de connaissances autochtones sont diversifiés, mais ils partagent souvent des principes ancrés dans la terre, la langue, les visions du monde holistiques, l'histoire et les traditions juridiques. L'inclusion et le soutien actif des systèmes de connaissances autochtones dans les plans climatiques du Canada aident à faire en sorte que les mesures fédérales de lutte contre les changements climatiques mènent à l'atténuation des répercussions climatiques tout en faisant progresser la réconciliation et en amplifiant le leadership autochtone en matière de climat.

3.2. Aperçu de l'approche de modélisation

L'atteinte de la carboneutralité d'ici 2050 nécessitera une transformation en profondeur dans tous les secteurs de l'économie canadienne. Cette transition présente des opportunités évidentes pour le Canada, comme l'accroissement de la



compétitivité de nos secteurs traditionnels et des technologies émergentes propres dans les industries. Cependant, il y a de nombreuses voies différentes que le Canada pourrait emprunter pour atteindre la carboneutralité, chacune présentant ses propres défis et possibilités. Le monde continuera de changer d'ici 2050 et la composition énergétique exacte qui alimentera la société canadienne en 2050 reste à déterminer. La trajectoire du Canada vers 2050 évoluera au fur et à mesure que les changements de politiques mondiales et nationales influenceront les conditions du marché, y compris la disponibilité et la viabilité commerciale des technologies nécessaires pour favoriser la décarbonisation généralisée de l'économie canadienne. Malgré cette incertitude, il est clair que certains facteurs clés joueront un rôle dans la réduction des émissions dans tous les secteurs de l'économie : électrification, les carburants renouvelables et alternatifs, comme l'hydrogène à faible teneur en carbone, et l'utilisation élevée des technologies d'élimination du CO₂, par exemple les technologies d'élimination du carbone comme la Bioénergie avec captage et stockage du carbone (BECCS) et la capture directe du dioxyde de carbone (DAC)).

Sur la base de ces informations, l'objectif de la SLT du Canada est de fournir un échantillon des scénarios illustrant les approches possibles que le Canada pourrait adopter pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050. Conformément à la Stratégie pour le milieu du siècle de 2016 du Canada, la SLT du Canada n'est pas un plan d'action ni une politique normative — elle ne précise pas l'éventail de politiques, de mesures et de règlements qui seraient nécessaires pour faire la transition du Canada vers une économie carboneutre. Elle ne précise pas non plus les répercussions économiques potentielles, comme la croissance du PIB ou l'emploi. La SLT du Canada montre plutôt les répercussions sectorielles possibles, en termes d'émissions et de consommation finale d'énergie ainsi que la composition de la production d'électricité, selon des degrés d'influence différents des trois principaux catalyseurs pour atteindre la carboneutralité en 2050. Les trois conditions habilitantes sont les suivantes :

- Électrification : L'électrification généralisée de l'économie favorise la transformation énergétique des secteurs d'utilisation finale, y compris les transports, les bâtiments et l'industrie, tout en rendant l'approvisionnement en électricité non émetteur.
- Carburants renouvelables et alternatifs : L'utilisation d'hydrogène à faible teneur en carbone, ainsi que de carburants renouvelables (p. ex., gaz naturel renouvelable et liquides renouvelables) permet la transformation énergétique des secteurs d'utilisation finale, et ce particulièrement pour les bâtiments, la production d'électricité et les véhicules lourds.
- Technologies d'élimination du CO₂ : Des changements techniques plus rapides et l'utilisation élevée des technologies de captage du carbone, y compris le CSC, et le DAC permettent d'atteindre la carboneutralité.

Il est important de noter que les scénarios présentés ici ne représentent pas les voies les plus probables ou privilégiées vers la carboneutralité d'ici 2050, et que des résultats différents à l'intérieur ou à l'extérieur de la fourchette de ces scénarios sont possibles et ne se limitent pas aux conclusions de la présente analyse. En outre, cette analyse de modélisation ne tient pas compte des autres catalyseurs clés qui pourraient influencer



les trajectoires vers la carboneutralité au Canada, comme la gestion de la demande d'électricité et le plein potentiel des solutions fondées sur la nature.

Les scénarios de la SLT du Canada envisagent une approche nationale de la réduction des émissions. Toutefois, dans la pratique, les gouvernements provinciaux et territoriaux auront un rôle important à jouer dans la réduction des émissions dans les domaines qui relèvent de leur compétence, notamment en ce qui concerne les catalyseurs clés identifiés dans la SLT, tel que l'électrification. Les hypothèses de la SLT du Canada sont fondées sur les meilleures informations disponibles aujourd'hui et sont donc susceptibles de changer à l'avenir à mesure des avancées en innovation et en technologie.

La modélisation de la SLT du Canada considère d'abord un « scénario des hypothèses actuelles » qui reflète la compréhension des hypothèses et des technologies disponibles aujourd'hui, sur la base des meilleures informations disponibles. Le scénario des hypothèses actuelles est ensuite modifié avec différentes hypothèses sur le développement de technologies clés pour présenter trois scénarios : l'électrification élevée, l'utilisation élevée de carburants renouvelables et alternatifs et l'utilisation élevée de technologies d'élimination du CO₂. Dans tous les scénarios, l'approche de modélisation pour la SLT du Canada suppose une contribution de -100 Mt provenant de l'utilisation des sols, changement d'affectation des sols et foresterie (ATCATF). Bien que ce nombre soit cohérent avec l'hypothèse de la Stratégie pour le milieu du siècle de 2016 du Canada, le Canada reconnaît que les pratiques comptables pour le secteur ATCATF évoluent continuellement, y compris l'élaboration de méthodologies plus robustes et d'études des facteurs de changement d'utilisation des terres afin de prévoir les émissions futures dans différents scénarios. Le Canada continuera de mettre à jour ses projections et ses hypothèses pour le secteur ATCATF, conformément aux lignes directrices du GIEC, et ce, à mesure que les méthodes de comptabilisation s'améliorent.

La SLT du Canada utilise une approche « descendante » selon laquelle les émissions sont plafonnées à zéro émission nette d'ici 2050 et le modèle détermine la voie économique la plus souhaitable pour y arriver, en fonction des hypothèses. Tous les scénarios supposent que le Canada atteint sa CDN 2030 qui est de 40 % sous les niveaux de 2005 d'ici 2030, telle que modélisée dans le PRE 2030. Les hypothèses comprennent également une variété de politiques et de mesures qui sont déjà en place pour établir les bases du Canada vers des émissions nettes nulles (p. ex. la tarification du carbone, la production d'électricité carboneutre, l'adoption généralisée de VZE, etc.) Pour plus de détails sur les hypothèses technologiques, veuillez consulter l'annexe 1.

La modélisation de la SLT du Canada a été effectuée à l'aide de trois modèles internationaux, soit le Global Change Analysis Model (GCAM), Environment Canada's Integrated Assessment Model (EC-IAM) et le modèle d'équilibre général calculable Environment Canada's Multi-Sector, Multi-Regional Model (EC-MSMR). (Veuillez consulter l'Annexe 1 pour plus de détails sur chaque modèle et ses hypothèses). La combinaison de trois modèles fournit une approche robuste pour évaluer différentes approches en vue d'atteindre la carboneutralité. GCAM et EC-IAM sont deux modèles



d'évaluation intégrés, qui sont conçus pour évaluer les répercussions à long terme de la dynamique des systèmes environnementaux, sociaux et économiques. Le modèle EC-MSMR est un modèle EGC avec une représentation de l'économie mondiale, qui a la capacité d'analyser la transition énergétique et économique associée aux trajectoires de GES, et ce, avec une résolution industrielle est plus élevée.

Afin d'explorer un plus large éventail d'approches possibles pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050, la SLT du Canada résume également les résultats de la modélisation de la carboneutralité par des tiers partis déjà en place soit, l'Institut climatique du Canada (ICC) et l'Institut de l'énergie Trottier. Bien que les hypothèses et les approches de modélisation qui encadrent l'analyse réalisée par des tiers partis diffèrent de celles de la modélisation entreprise par le Canada, les résultats, de tiers partis et du gouvernement du Canada, aident à mettre en évidence l'importance de l'électrification, de l'utilisation des carburants renouvelables et alternatifs et de l'utilisation élevée des technologies d'élimination du CO₂ pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050. D'autres organisations et tierces parties au Canada, comme la Régie de l'énergie du Canada, travaillent également à la production de leurs propres scénarios de carboneutralité.



Tableau 2 : Aperçu des scénarios

Scénario	Voies possibles de réduction des émissions			Description
	Électrification	H ₂ et bioénergie	Technologies d'élimination du CO ₂	
Hypothèses actuelles	Déterminée par le modèle	Déterminée par le modèle	Déterminée par le modèle	La trajectoire modélisée, compte tenu des hypothèses fondées sur la compréhension actuelle des coûts et des contraintes liées à la réalisation d'émissions nettes nulles. Répond aux engagements du Canada d'atteindre la carboneutralité en ce qui concerne : • Ventes de véhicules neufs zéro émission • Production d'électricité carboneutre d'ici 2035
Électrification élevée	Élevée	Faible	Faible	Électrifier les secteurs de la transformation de l'énergie et de l'utilisation finale : • Chauffage des bâtiments et autres utilisations • Transport par véhicules électriques à batterie • Industrie lourde • Production d'hydrogène par électrolyse
Utilisation élevée de carburants renouvelables et alternatifs	Moyenne à élevée	Moyenne	Faible	Utilisation d'hydrogène et de carburants de remplacement dans : • Véhicules lourds, aviation, transports maritime et ferroviaire • Chauffage des bâtiments avec mélange et nouvelles technologies • Industrie lourde • Production d'hydrogène par PRM/électrolyse
Utilisation élevée des technologies d'élimination du CO ₂	Moyenne	Faible	Moyenne à élevée	Meilleur rapport coût-efficacité des technologies de CO ₂ : • capture directe du dioxyde de carbone (DAC) Capture et stockage du carbone (CSC) ⁶

⁶ Le captage et stockage du carbone (CSC) comprend la bioénergie avec captage et stockage du carbone (BECCS).



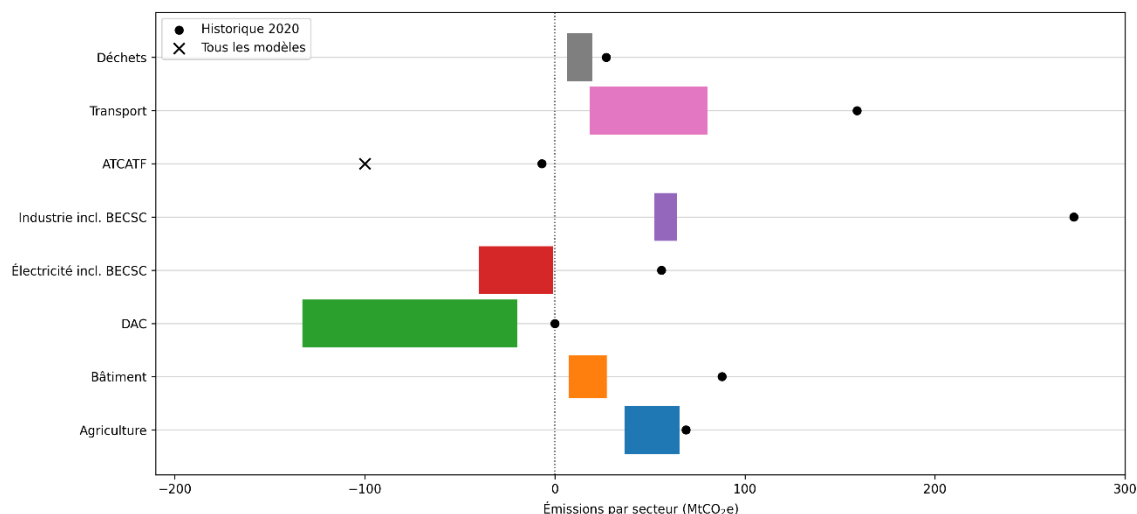
3.3. Scénario 1 : Hypothèses actuelles

Le scénario des hypothèses actuelles présente plusieurs trajectoires de décarbonisation profonde à partir de modèles ayant différentes visions de la trajectoire la plus efficace économiquement pour atteindre la carboneutralité, en fonction de la compréhension actuelle des coûts et des contraintes existantes. Comme des modèles internationaux sont utilisés pour cette analyse, le scénario des hypothèses actuelles est influencé par des hypothèses à la fois mondiales et spécifiques au Canada.

Les résultats modélisés montrent que l'atteinte de la carboneutralité dans l'ensemble de l'économie canadienne ne signifie pas nécessairement que les réductions des émissions sont égales d'un secteur à l'autre. Comme le montre la figure 1, bien que les émissions restantes soient faibles dans le secteur du bâtiment ou négatives dans le secteur de l'électricité, les émissions de GES dans le secteur des transports présentent des variations entre les modèles selon leurs hypothèses technologiques. Les modèles révèlent que les émissions du secteur des industries (y compris les émissions de pétrole et de gaz) persistent en raison de certaines utilisations de combustibles fossiles. Ces émissions de GES restantes sont compensées par des technologies à émissions nettes négatives comme la BECSC, le DAC, et l'ATCATF. Les émissions nettes négatives totales de chaque modèle varient de -139 à -249 Mt eq. CO₂. Ces variations du potentiel de réduction des émissions restantes influencent fortement la manière d'atteindre la carboneutralité de chaque modèle⁷.

⁷ À noter que l'on suppose que l'ATCATF est de -100 Mt pour tous les modèles. Cela correspond à l'hypothèse de la stratégie pour le milieu du siècle de 2016. Cette estimation est fondée sur une analyse qui ne tient pas compte de l'évolution des pressions exercées sur les terres par d'autres secteurs et ne tient pas nécessairement compte des activités sur les terres qui seront nécessaires pour soutenir la voie vers la carboneutralité (p. ex., accès à des ressources comme des minéraux essentiels et des biomatériaux).

Figure 1 : Émissions du Canada par source en 2050 — Scénario des hypothèses actuelles⁸



Variations et intervalles entre les modèles

ECCC a modélisé quatre scénarios pour illustrer une vaste gamme de voies énergétiques et technologiques possibles pour atteindre la carboneutralité. L'exercice de modélisation a utilisé trois modèles internationaux d'ECCC : GCAM, EC-IAM et EC-MSMR. L'intervalle illustré dans les graphiques représente les résultats obtenus dans l'ensemble des modèles. Cet intervalle de valeurs provient des distinctions structurelles et philosophiques des modèles, ainsi que des hypothèses et des contraintes propres aux modèles. La façon dont les modèles sont structurés (descendant ou ascendant) et que les coûts sont définis influencent fortement la dynamique des modèles. Les IAM comme GCAM et EC-IAM suivent une philosophie de l'ingénierie pour représenter la résolution technologique. Les modèles d'équilibre général calculable, comme le EC-MSMR, suivent une philosophie économique où les technologies sont définies par la représentation de courbes des coûts.

Chaque modèle traite les hypothèses de scénario différemment même si ces hypothèses sont comparables d'un modèle à l'autre. Le mérite de l'approche de modélisation réside dans son algorithme qui permet aux activités de secteurs et de régions distincts de s'interconnecter et de prendre des décisions optimales et uniques dans le cadre des mécanismes de marché. Cette interaction économique peut être élargie grâce à une option de modélisation mondiale qui relie les possibilités entre les régions afin de promouvoir de nouvelles technologies essentielles pour un enjeu mondial, comme les changements climatiques. Les détails du modèle et des hypothèses sont présentés dans l'annexe 1.

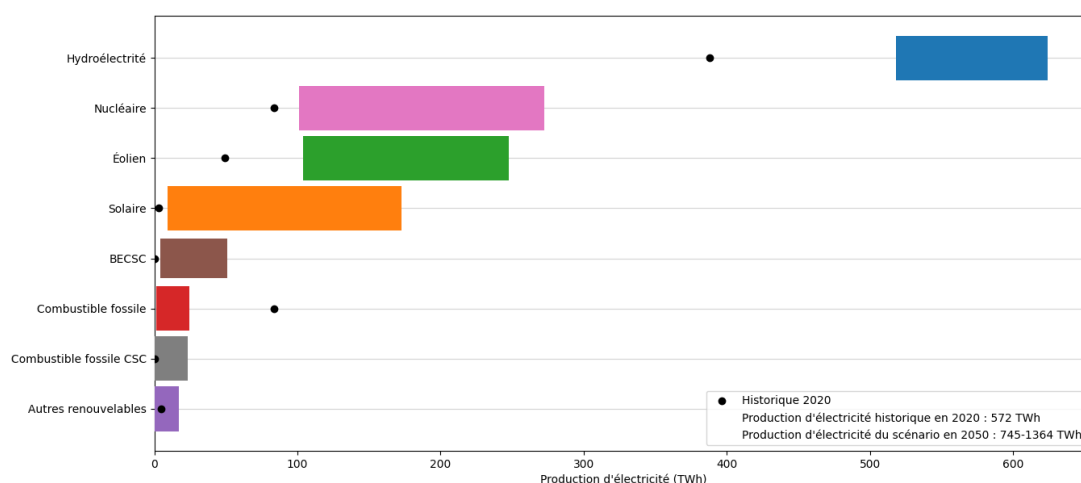
La figure 2 illustre la transformation profonde vers la production d'électricité propre, le secteur de l'électricité devenant net négatif. L'électricité totale produite en 2050 varie de 745 à 1364 TWh. Comparativement à 2020⁹, l'augmentation du niveau de production dans le scénario des hypothèses actuelles varie de 30 % à 138 %, selon

⁸ Le secteur industriel comprend les minéraux non métalliques, le fer et l'acier, les produits chimiques, les pâtes et papiers, les métaux non ferreux, le matériel de transport, les textiles, les produits alimentaires, les produits du bois, le raffinage, la construction, d'autres secteurs de fabrication, ainsi que l'extraction de pétrole, de gaz et de charbon. Certains modèles ne peuvent pas extrapoler les résultats par sous-secteur, mais des renseignements supplémentaires sur le pétrole et le gaz sont disponibles à l'annexe 1.

⁹ Basé sur cas de référence E3MC de l'ECCC (Ref21)

l'efficacité de l'électrification dans les modèles. Dans le scénario des hypothèses actuelles, il y a un déploiement important de la production d'électricité renouvelable. Les technologies renouvelables représentent une part élevée de la production d'électricité en 2050, avec 77 % à 86 % de la production totale au Canada qui est renouvelable. Si l'on inclut le nucléaire, la part de la production d'électricité propre est de 97 % à 100 % en 2050. D'ici 2050, les combustibles fossiles, y compris le CSC, génèrent moins de 3 % de l'électricité dans tous les modèles. Le déploiement des technologies de CSC dans le scénario des hypothèses actuelles est moins important que celui des technologies renouvelables. Les technologies de la BECSC compensent pour les émissions restantes du secteur de l'électricité et d'autres secteurs économiques.

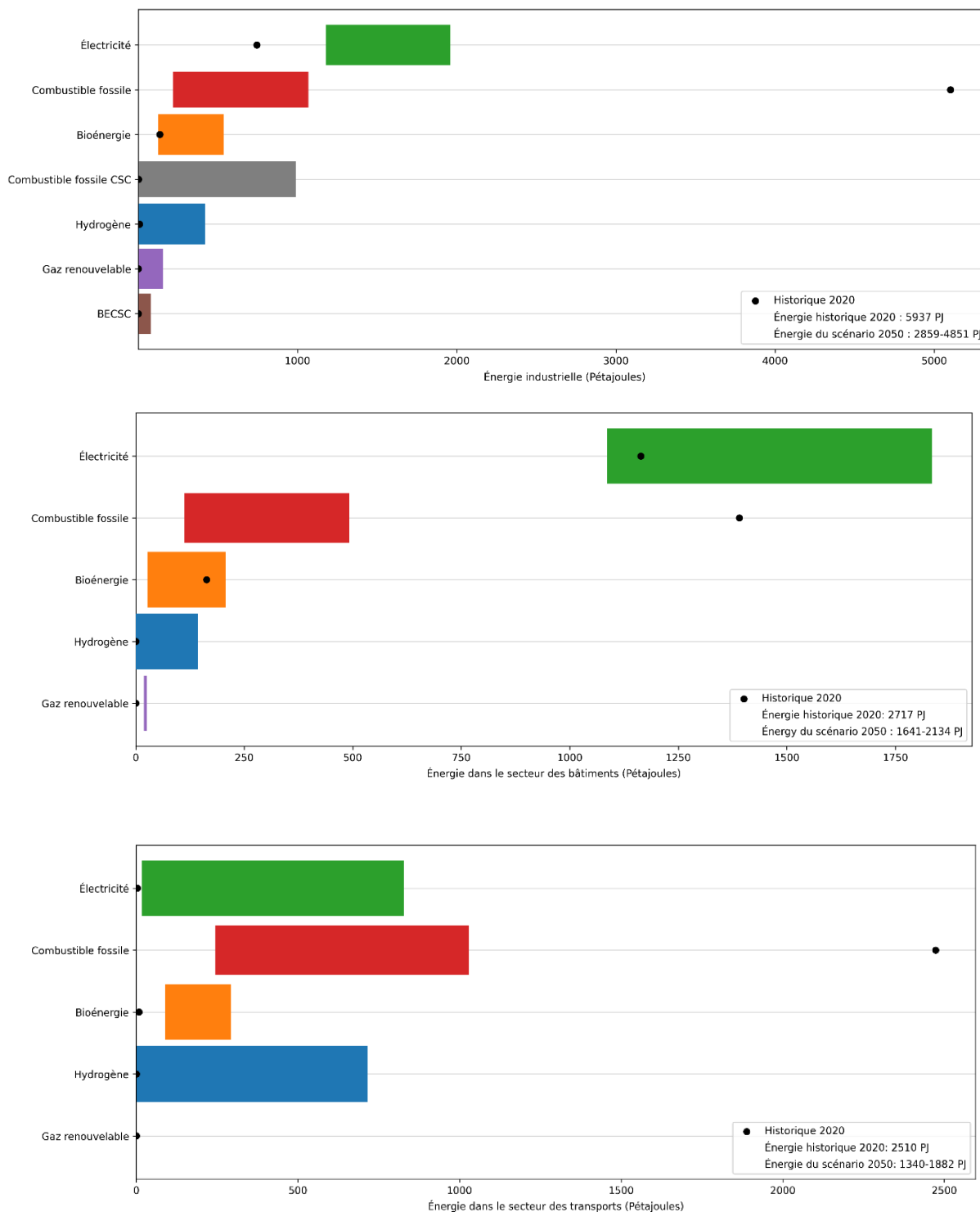
Figure 2 : Composition de la production d'électricité au Canada en 2050 — Scénario des hypothèses actuelles



L'utilisation finale de l'énergie par secteur montre une trajectoire différente pour chaque secteur (voir la figure 3). Dans le secteur de l'industrie, certains modèles accordent plus d'importance au changement de combustible, tandis que d'autres réduisent les besoins en énergie par des gains d'efficacité. Dans tous les modèles, les besoins en énergie des combustibles fossiles sont réduits dans ce secteur, mais ne sont pas entièrement éliminés, et les technologies de captage et de stockage du carbone contribuent à la réduction des GES résiduelles provenant des combustibles fossiles. La consommation de carburant dans les bâtiments résidentiels et commerciaux est remplacée par l'électricité. Le secteur des transports présente différentes trajectoires selon les modèles. Certaines sources de combustibles fossiles passent à l'électricité ou à des carburants alternatifs, comme la bioénergie ou l'hydrogène. Il faut noter que les technologies électriques avancées ont une efficacité énergétique supérieure à celle des technologies utilisant des combustibles fossiles dans les secteurs du bâtiment et du transport et donc moins d'énergie est nécessaire pour fournir la même quantité de service.



Figure 3 : Consommation finale d'énergie au Canada par secteur en 2050 — Scénario des hypothèses actuelles

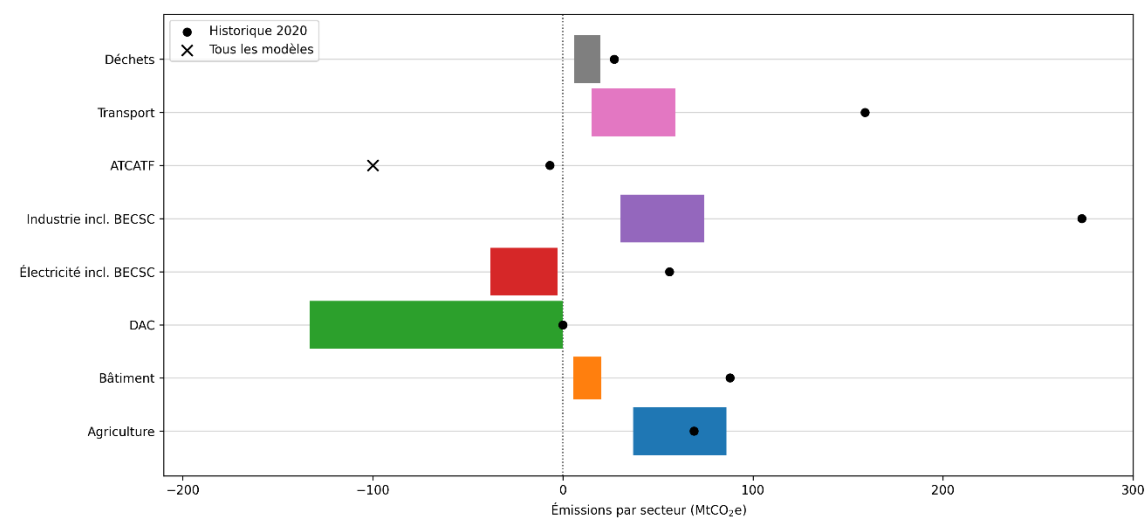


3.4. Scénario 2 : Électrification élevée

Le scénario d'électrification élevée montre une électrification généralisée dans tous les secteurs de l'économie. Pour promouvoir cette augmentation de l'électrification, ce scénario suppose que les technologies électriques deviennent plus abordables. Toutes les émissions résiduelles dans ce scénario sont compensées par la reforestation (ATCATF) et les technologies de captation et de stockage du carbone comme la BECSC et le CDA.

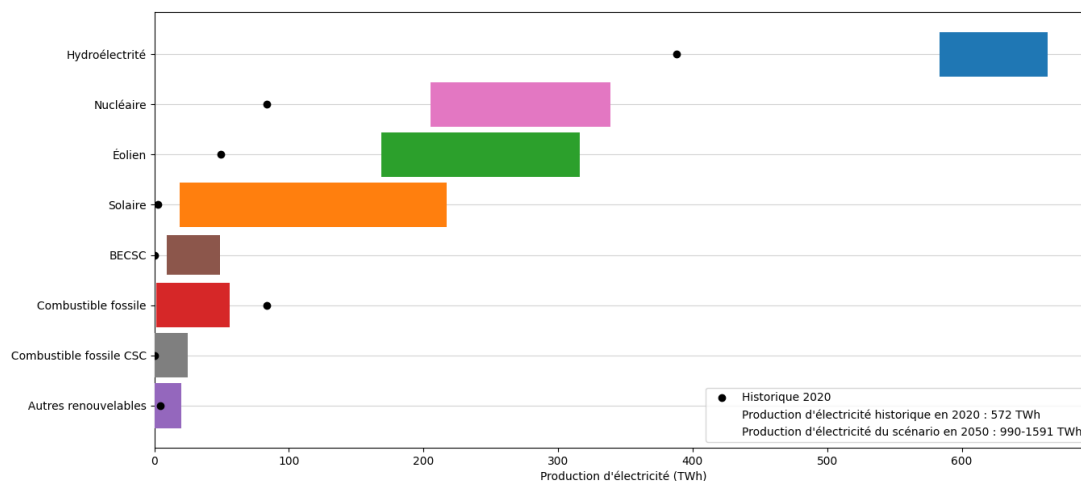
Les émissions résiduelles résultant du scénario d'électrification élevée sont présentées à la figure 4. Comme dans le scénario des hypothèses actuelles, les secteurs de l'agriculture, de l'industrie, et du transport présentent un niveau important d'émissions résiduelles dans tous les résultats modélisés. Pour réduire ces émissions résiduelles, le scénario suppose que des technologies d'élimination du CO₂ sont déployées, incluant l'ATCATF, la BECSC et le DAC, pour éliminer entre -124 et -249 Mt d'éq. CO₂.

Figure 4 : Émissions du Canada par source en 2050 — Scénario d'électrification élevée



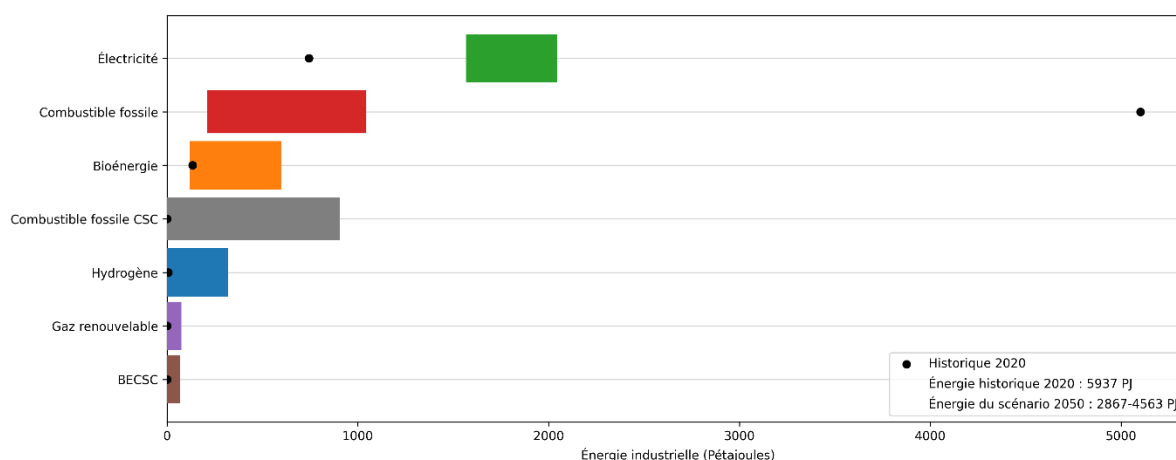
Comme le montre la figure 5, la production d'électricité dans le scénario d'électrification élevée atteint un intervalle de 990 à 1591 TWh, soit une augmentation de 18 % à 33 % par rapport au scénario des hypothèses actuelles. Dans ce scénario, la production d'électricité est carboneutre grâce au déploiement d'un large éventail de sources d'énergie renouvelables, principalement l'hydroélectricité, ainsi que de technologies de production à faibles émissions de carbone (nucléaire et CSC).

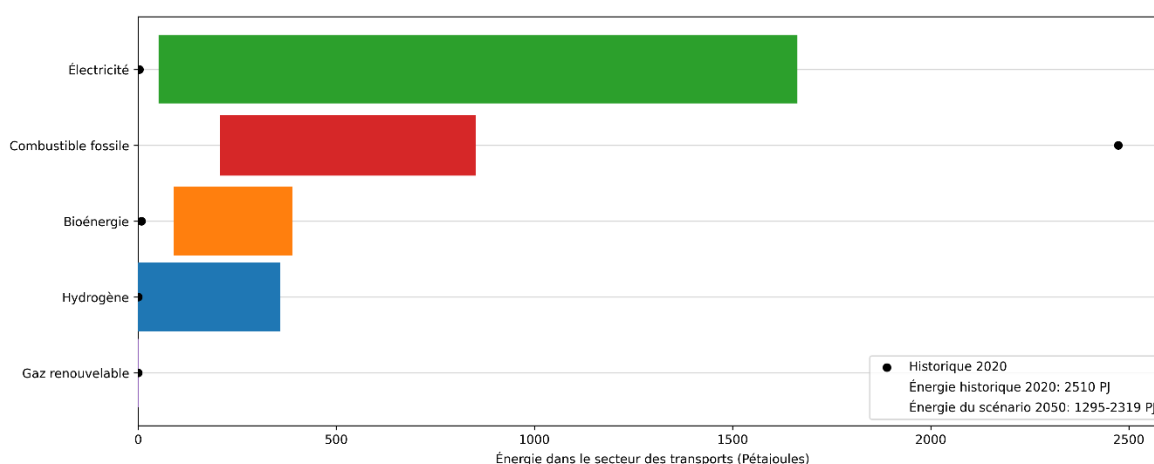
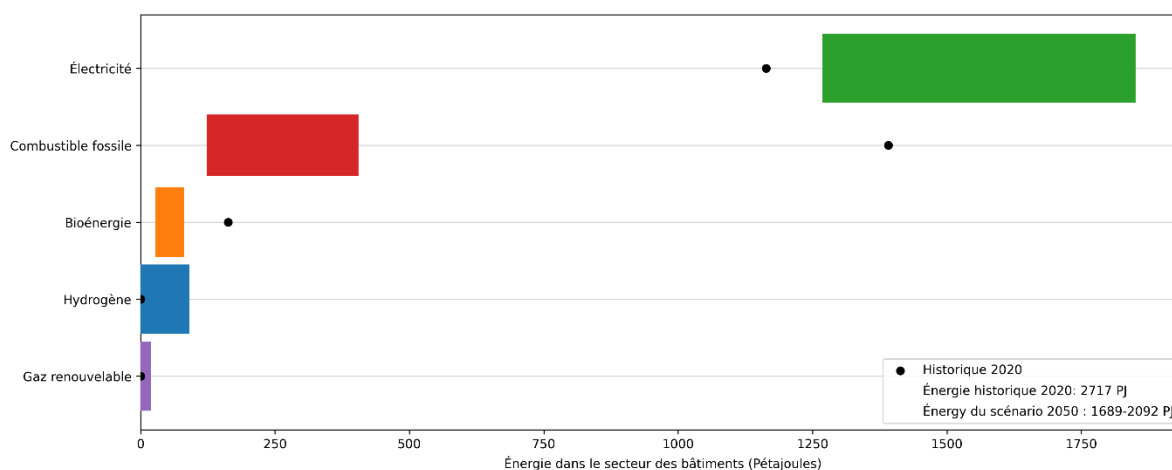
Figure 5 : Composition de la production d'électricité au Canada en 2050 — Scénario d'électrification élevée



Ce scénario prévoit un déploiement élevé de l'électricité (illustré à la figure 6) en raison de la compétitivité des technologies électriques par rapport aux technologies conventionnelles à base de combustibles fossiles dans différents secteurs. Le secteur des transports est en mesure de réduire ses émissions grâce à l'électrification des véhicules légers, moyens et lourds. Les technologies de pointe comme les thermopompes électriques dans les systèmes de chauffage des bâtiments permettent une réduction importante des émissions. Comme dans le scénario des hypothèses actuelles, l'électricité domine parmi les autres sources d'énergie du secteur industriel, mais le secteur de l'industrie présente toujours une part importante d'autres énergies dans la composition énergétique industrielle, principalement en raison de la diversité des processus de production entre les industries.

Figure 6 : Consommation finale d'énergie au Canada par secteur en 2050 — Scénario d'électrification élevée



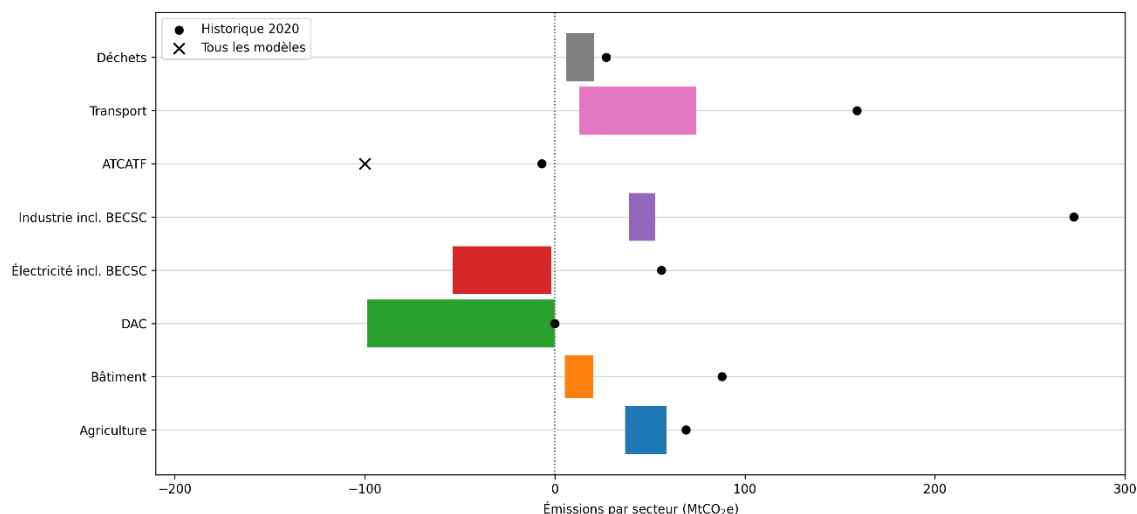


3.5. Scénario 3 : Utilisation élevée de carburants renouvelables alternatifs

Ce scénario illustre une trajectoire vers la carboneutralité grâce à l'utilisation élevée de carburants renouvelables et de substitution, comme l'hydrogène à faible teneur en carbone et les bioénergies. Dans ce scénario, des ressources comme l'hydrogène complètent l'électrification généralisée, en particulier dans les secteurs industriels plus difficiles à électrifier, ainsi que dans le transport lourd, comme l'aviation, les camions de marchandises et le transport maritime. Le scénario suppose une réduction des coûts dans la production d'hydrogène propre ainsi que des développements majeurs des technologies d'utilisation finale d'hydrogène.

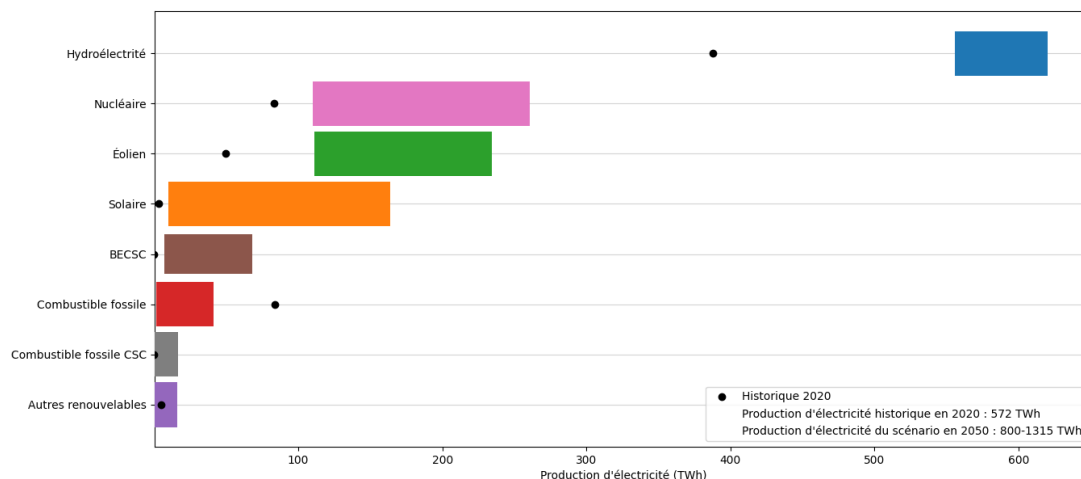
Ce scénario présente un profil des émissions de 2050 semblable à celui (voir la figure 7) du scénario des hypothèses actuelles, avec des émissions résiduelles étant principalement présentes dans les secteurs de l'industrie, des déchets, de l'agriculture ainsi que dans le secteur des transports. Selon le modèle, la captation d'émissions par la BECSC, le DAC et ATCATF représentent une grande quantité d'émissions négatives, un total combiné allant de -124 à -215 MtCO₂e.

Figure 7 : Émissions du Canada par source en 2050 — Scénario d'utilisation élevée des carburants renouvelables et alternatifs



Le niveau de production d'électricité dans ce scénario varie de 800 à 1315 TWh, comme le montre la figure 8. De manière générale, la composition du portefeuille énergétique utilisé pour la production d'électricité est semblable aux autres scénarios.

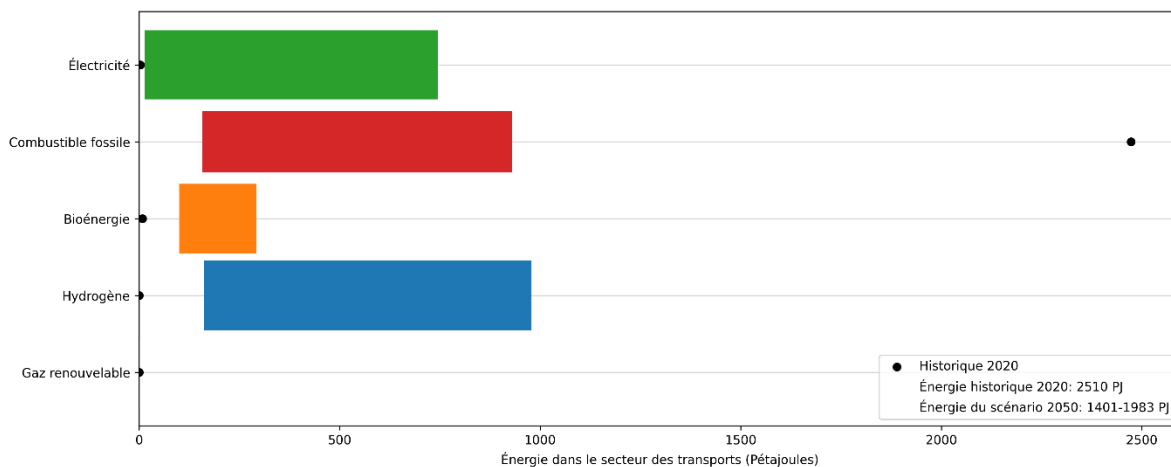
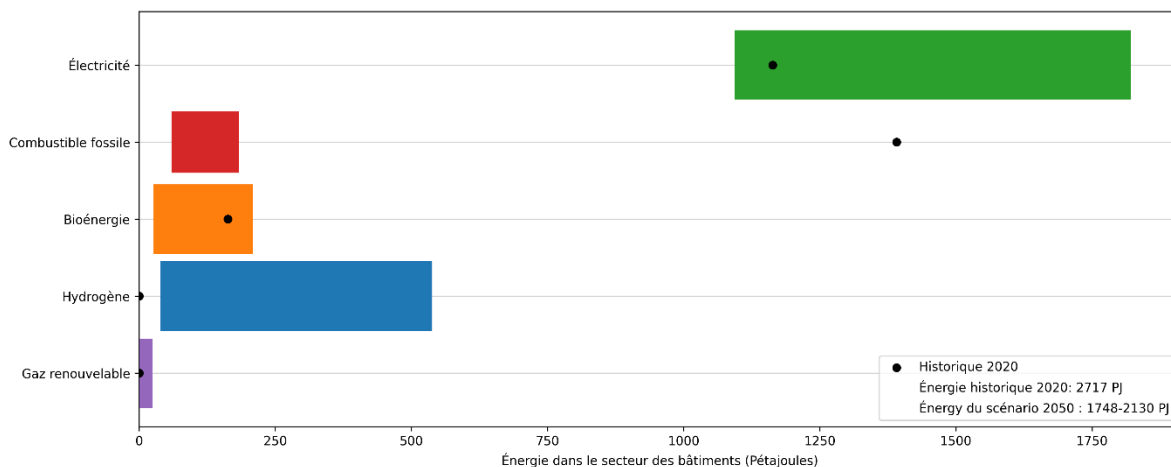
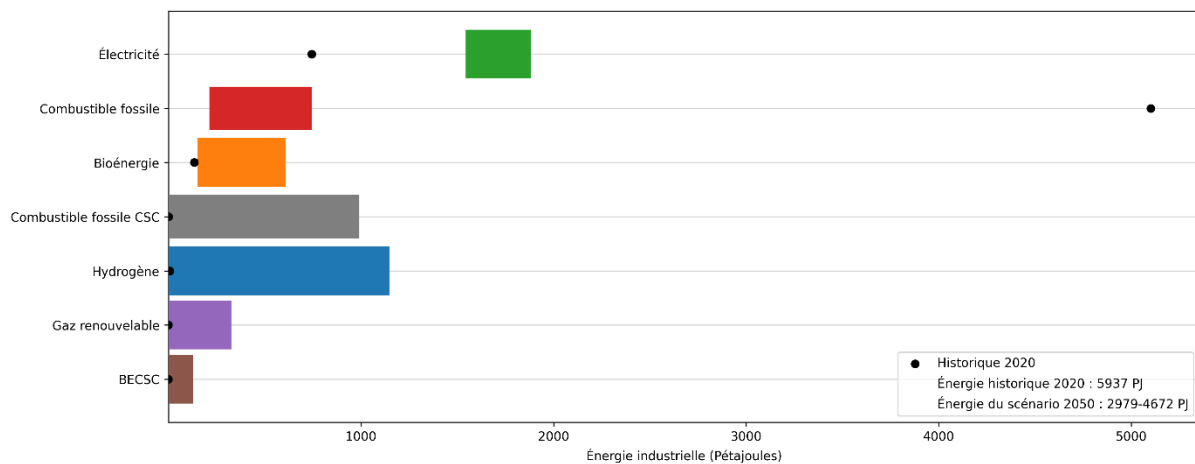
Figure 8 : Composition de la production d'électricité au Canada en 2050 — Scénario d'utilisation élevée des carburants renouvelables et alternatifs



Ce scénario montre une augmentation substantielle de la demande d'hydrogène en 2050, (illustré à la figure 9) de l'ordre de 29 % à 339 % par rapport au scénario des hypothèses actuelles. Comme dans le scénario des hypothèses actuelles, le secteur du bâtiment présente de faibles niveaux d'émissions résiduelles et dépend principalement de l'électricité. En revanche, le secteur des transports voit une augmentation importante de la consommation d'hydrogène et de biocarburants, avec une augmentation de 31% à 60 % par rapport au scénario des hypothèses actuelles.



Figure 9 : Consommation finale d'énergie au Canada par secteur en 2050 : Scénario d'utilisation élevée des carburants renouvelables et alternatifs

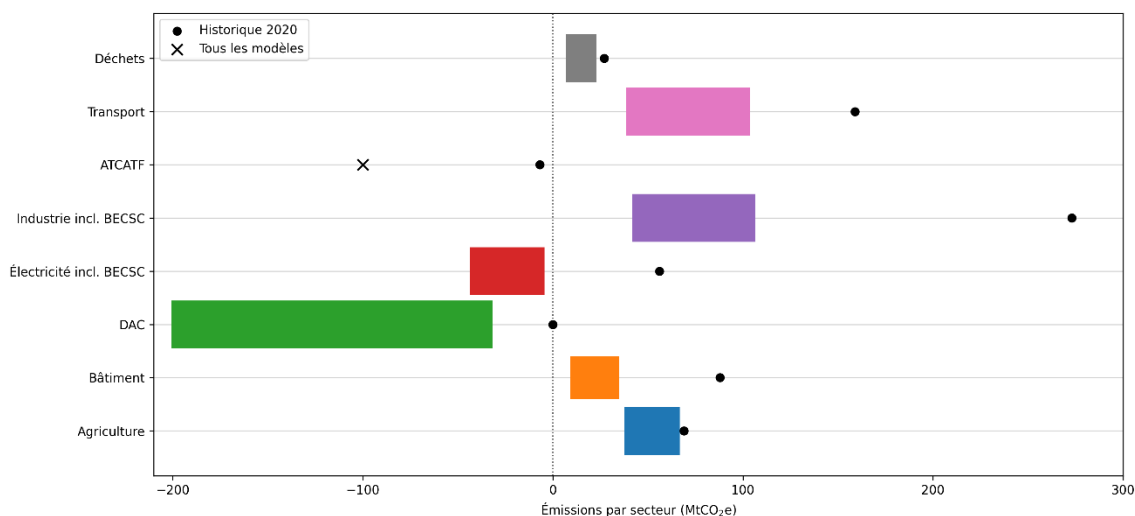


3.6. Scénario 4 : Utilisation élevée des technologies d'élimination du CO₂

Le scénario d'utilisation élevée des technologies d'élimination du CO₂ explore l'impact d'un changement technologique plus rapide et d'une plus grande utilisation des technologies de captation du carbone, y compris CSC et DAC. Ce scénario suppose que les technologies d'élimination du CO₂ deviennent plus abordables et efficaces, ce qui entraîne leurs déploiements accrus dans divers secteurs industriels, la production d'électricité et le secteur pétrolier et gazier.

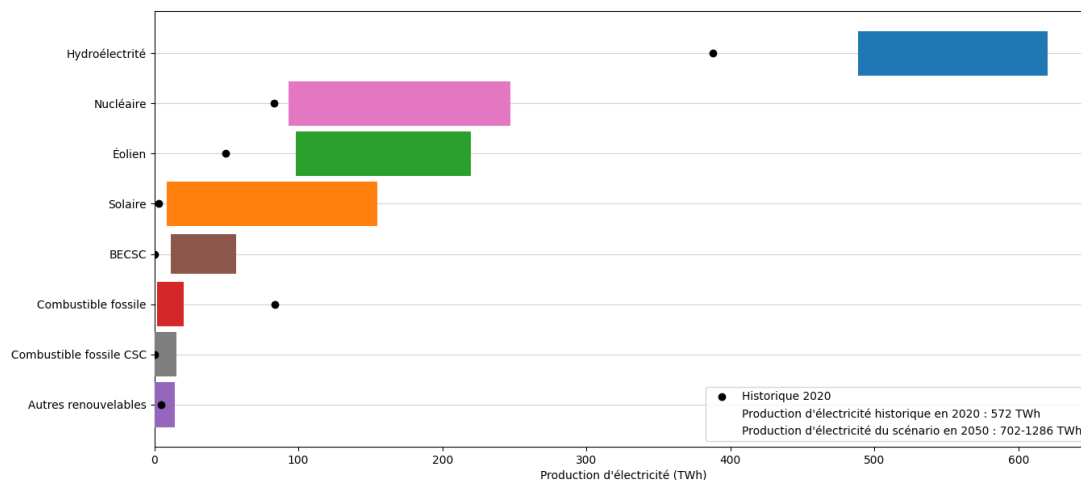
Tel qu'illustré à la figure 10, dans ce scénario, les technologies de captation du CO₂ (DAC, BECSC et l'ATCATF) contribuent à l'élimination de -177 à -326 Mt d'éq. CO₂. Par rapport au scénario des hypothèses actuelles, le DAC augmente considérablement, bien que sa contribution relative varie en raison des hypothèses entourant la compétitivité respective des technologies.

Figure 10 : Émissions du Canada par source en 2050 — Scénario d'utilisation élevée des technologies d'élimination du CO₂



Comme le montre la figure 11, les technologies renouvelables dominent l'expansion de la production d'électricité. Les technologies de CSC sont toujours présentes dans la production d'électricité, cependant, même avec les hypothèses du scénario d'utilisation élevée des technologies d'élimination du CO₂, le CSC n'est pas significativement plus déployé que dans le scénario des hypothèses actuelles. Le secteur de l'électricité demeure un secteur net négatif de l'économie canadienne et contribue à éliminer les émissions de GES de d'autres secteurs plus difficiles à réduire.

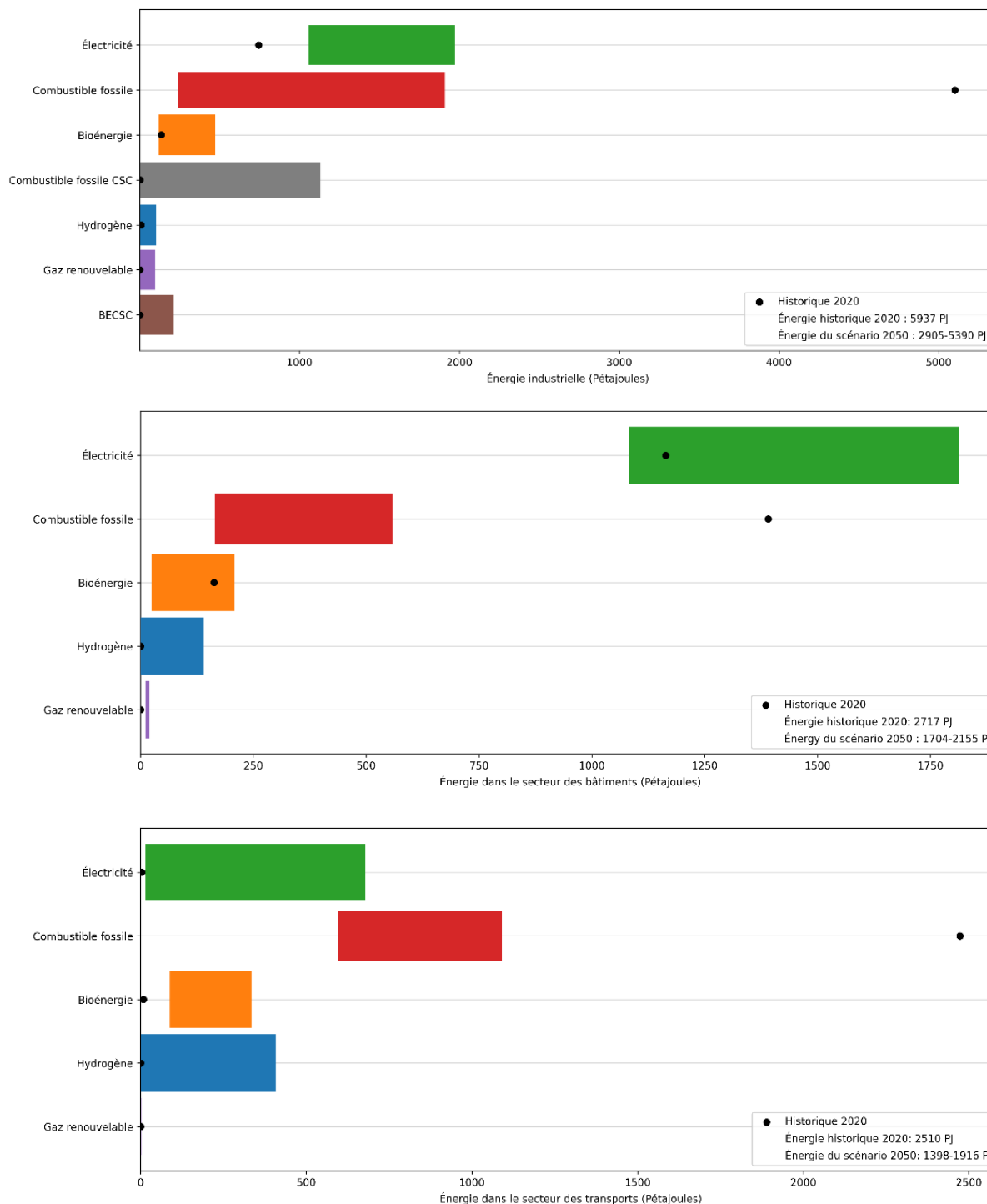
Figure 11 : Composition de la production d'électricité au Canada en 2050— Scénario d'utilisation élevée des technologies d'élimination du CO₂



Par rapport au scénario des hypothèses actuelles, les technologies de captation du CO₂ influencent considérablement la composition énergétique dans les secteurs d'utilisation finale, bien que l'électrification joue toujours un rôle clé. Comme le montre la figure 12, le changement de combustible est moins important dans ce scénario et les combustibles fossiles avec et sans CSC sont plus présents que dans le scénario des hypothèses actuelles.



Figure 12 : Consommation finale d'énergie au Canada par secteur en 2050 — Scénario d'utilisation élevée des technologies d'élimination du CO₂





Résultats de la modélisation par des tiers — Institut de l'énergie Trottier et Institut climatique du Canada

Le tableau 3 présente, en complément des résultats de la modélisation de la SLT du Canada, les analyses des voies à suivre accessibles au public réalisées par l'Institut de l'énergie Trottier et l'Institut climatique du Canada.

Dans la modélisation de l'Institut de l'énergie Trottier — [Perspectives énergétiques canadiennes 2021 : Horizon 2060](#) — divers scénarios de carboneutralité ont été explorés, mais une seule voie visait à atteindre la carboneutralité d'ici 2050 (NZ50). Voici les principaux constats :

- À l'instar des résultats des scénarios du Canada, d'importantes émissions résiduelles ont été observées dans les résultats du scénario, ce qui indique la nécessité des technologies d'élimination du carbone, la plupart des émissions résiduelles provenant des transports, de l'agriculture et des déchets,
- L'industrie ainsi que des secteurs de l'électricité peuvent contribuer à la réduction des émissions restantes, comparativement aux résultats des scénarios du Canada où le secteur de l'électricité est le seul secteur négatif net.
- Conformément aux résultats des scénarios de la SLT du Canada, l'augmentation de la production d'hydrogène a entraîné une augmentation de son utilisation dans les secteurs des transports et de l'industrie et la demande d'électricité a connu une forte croissance.

Dans la modélisation [de l'Institut climatique du Canada](#), un total de 62 trajectoires vers la carboneutralité ont été explorées, la seule « politique » mise en œuvre étant un plafond des émissions à zéro émission nette en 2050 dans tous les scénarios. Par conséquent, toutes les trajectoires atteignent le même niveau de réduction des émissions, mais les mesures d'atténuation utilisées pour atteindre ces réductions varient. Voici les principaux constats :

- Dans tous les scénarios, une part croissante de l'électricité, de l'hydrogène et des biocarburants a été observée, ce qui est semblable aux résultats des scénarios du Canada.
- Dans le secteur de l'industrie, la nécessité d'émissions négatives a été observée dans toutes les scénarios.
- À l'instar des résultats de la modélisation de l'Institut de l'énergie Trottier et de *Vision 2050*, les émissions négatives sont jugées nécessaires pour atteindre la cible de carboneutralité du Canada d'ici 2050, notamment grâce au déploiement du DAC et de la BECCS.
- Cependant, l'analyse de l'ICC a révélé que le Canada peut atteindre la carboneutralité d'ici 2050 sans compter sur des solutions négatives d'ingénierie, si les solutions axées sur la nature jouent un rôle plus important. Cette conclusion est différente des résultats des scénarios du Canada.

Tableau 3 : Émissions canadiennes par secteur en Mt d'éq. CO₂ — Modélisation du gouvernement du Canada et résultats de tiers-parties

Scénarios	Secteur	2020 ^a		2050	
		Historique	Scénarios du gouvernement du Canada	Institut de l'énergie Trottier	Institut climatique du Canada (ICC) ^e
Agriculture		69	37 à 86	41	58 à 73
Bâtiments		88	5 à 35	3	3 à 22
Électricité ^b		56	-54 à -1	-55	-12 à 6
Industrie ^c		273	30 à 107	-30	10 à 99
Transport		159	13 à 104	51	11 à 65
Déchets		27	6 à 23	9	5 à 6
Total (sauf DAC et ATCATF)		672	100 à 301	19 ^d	75 à 271
DAC		-	-201 à 0	-15	-166 à 0
ATCATF		-7	-100	-	-105

a : Source : [Rapport d'inventaire national 2022](#)

b : Inclut BECCS

c : Comprend le BECCS et l'industrie pétrolière et gazière.

d : Les valeurs sont indiquées comme dans les Perspectives énergétiques du Canada

e : Ces résultats sont basés sur les 62 scénarios zéro net de l'étude Canada's Net Zero Future. Ici, l'Institut rapporte les 80e et 20e pourcentages.



3.7. Résumé des scénarios

Dans l'ensemble des modèles et des scénarios, il existe certaines similitudes en ce qui a trait aux émissions de 2050 par secteur. Toutefois, dans d'autres secteurs, il y a un plus grand éventail de résultats possibles (tableau 4).

Tableau 4 : Émissions canadiennes par secteur en 2020 et 2050 — Tous les scénarios

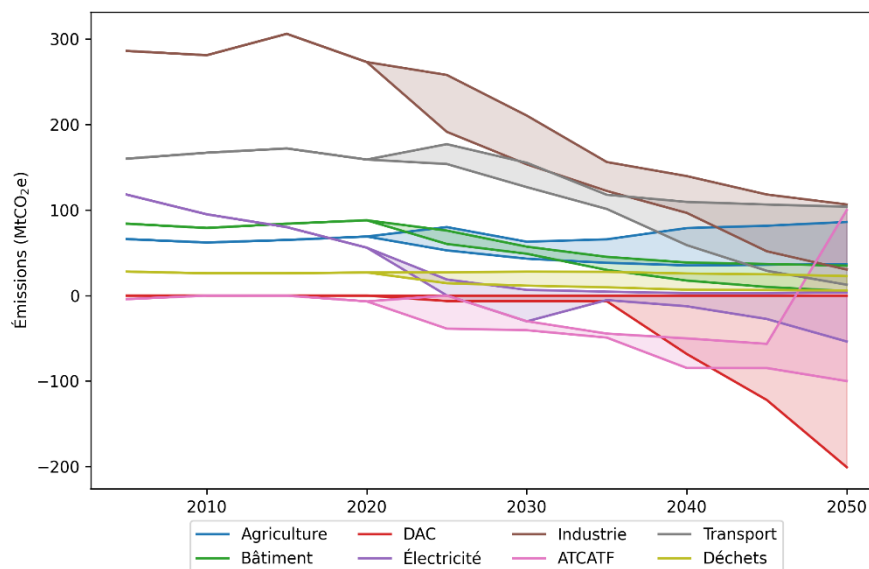
Secteur Scénarios	2020 ^a Historique	Hypothèses actuelles	Électrification élevée	2050 Utilisation élevée des carburants renouvelables et alternatifs	Utilisation élevée des technologies d'élimination du CO ₂
Agriculture	69	37 à 66	37 à 86	37 à 59	38 à 67
Bâtiments	88	7 à 27	6 à 20	5 à 20	9 à 35
Électricité ^b	56	-40 à -1	-38 à -3	-54 à -2	-44 à -4
Industrie ^c	273	52 à 64	30 à 74	39 à 53	42 à 107
Transport	159	18 à 81	15 à 59	13 à 74	39 à 104
Déchets	27	6 à 0	6 à 20	6 à 21	7 à 23
Total (sauf DAC et ATCATF)	672	100 à 233	100 à 233	100 à 199	131 à 301
DAC	-	-133 à -20	-133 à 0	-99 à 0	-201 à -32
ATCATF	-7	-100	-100	-100	-100

a: Source: [Rapport d'inventaire national 2022](#)

b: Inclut BECSC

c : Comprend le BECSC et l'industrie pétrolière et gazière

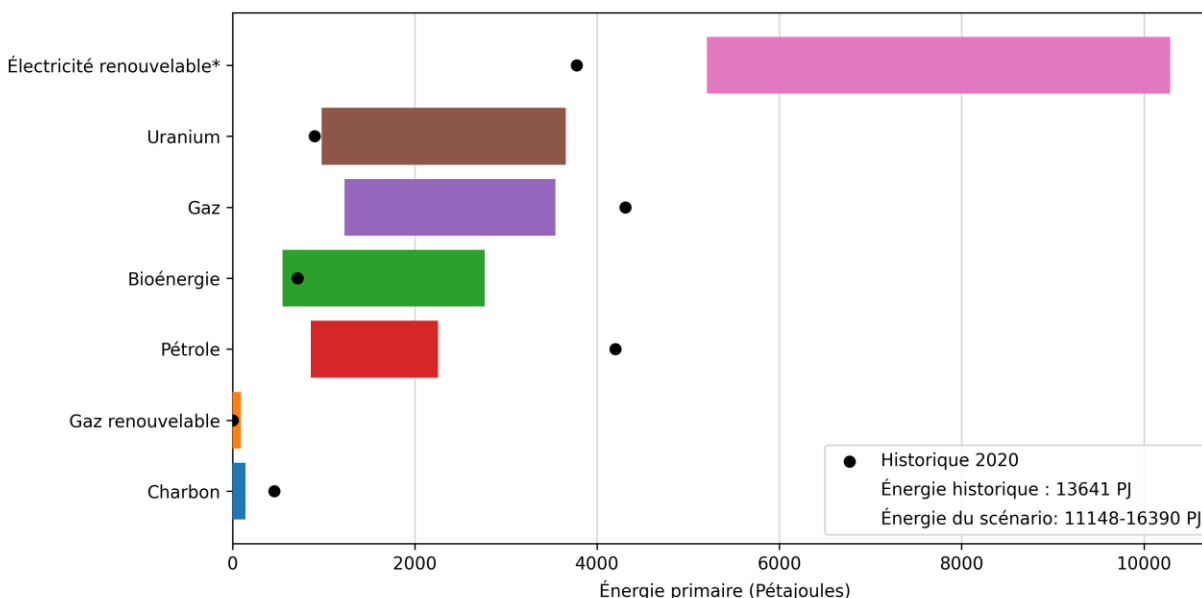
La trajectoire de chaque secteur jusqu'en 2050 dans tous les scénarios modélisés est présentée à la figure 13, avec des parties ombrées représentant les intervalles dans les trajectoires d'émissions. Comme le montre la figure, il existe de nombreuses projections offrant un large éventail de possibilités pour atteindre la carboneutralité au Canada. Bien que ces intervalles des trajectoires d'émissions ne constituent pas une liste exhaustive des trajectoires possibles, elles sont utiles pour dégager les tendances générales.

Figure 13 : Émissions au Canada 2005-2020 - tous les scénarios

Trajectoires potentielles d'énergie

L'analyse des scénarios de la SLT du Canada donne également un aperçu des technologies clés qui pourraient favoriser la transition du Canada vers la carboneutralité. L'analyse du portefeuille énergétique est important parce que la structure de l'économie canadienne de l'avenir dépendra fortement de la trajectoire que le Canada empruntera en matière d'énergie d'ici 2050. Par exemple, si les technologies de captation du CO₂ sont déployées rapidement et à grande échelle, la production et la consommation de combustibles fossiles pourraient demeurer plus élevées que dans d'autres scénarios, tandis que si l'électricité et l'hydrogène sont fortement utilisés, la structure économique du Canada pourrait être très différente. La consommation d'énergie primaire est illustrée à la figure 14, où les barres horizontales représentent l'intervalle des résultats de tous les scénarios modélisés. Les résultats de la modélisation montrent que l'électricité de source renouvelable domine les autres sources d'énergie, ce qui représente une valeur minimale de 36 % de l'énergie primaire totale (EPT). Aux fins de la présente analyse de modélisation, l'électricité renouvelable comprend l'hydroélectricité, l'énergie éolienne, l'énergie solaire et l'énergie géothermique. L'uranium et le gaz naturel représentent également une part importante de l'EPT, avec une proportion maximale de 31 % et de 28 %, respectivement.

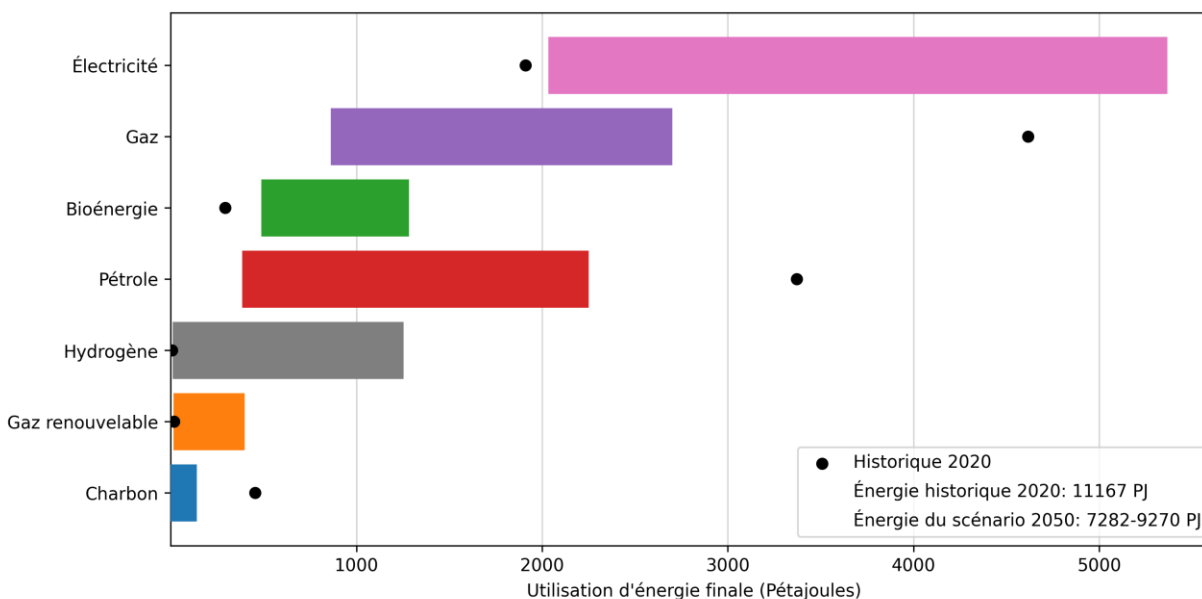
Figure 14 : Scénarios de l'utilisation d'énergie primaire par source au Canada en 2050



* La production d'électricité à partir de sources renouvelables est convertie avec un taux d'efficacité de 42 %.

La figure 15 montre l'intervalle des résultats de modélisation du portefeuille énergétique final utilisée au Canada en 2050. Comme pour la ventilation de la consommation d'énergie primaire à la figure 14, l'électricité domine toutes les autres formes d'énergie, avec une valeur maximale de 5 367 pétajoules (PJ) parmi tous les scénarios. Cette utilisation répandue de l'électricité peut être distribuée dans tous les secteurs d'utilisation finale de l'économie. Après l'électricité, le gaz naturel représente également une part importante de la demande totale d'énergie finale variant de 12 % à 41 %. L'extrémité supérieure de l'intervalle représente un cas où il y a une utilisation élevée des technologies d'élimination du CO₂, ce qui permet une plus grande consommation de gaz naturel en 2050. L'extrémité inférieure du spectre représente d'autres cas où il y a des niveaux élevés d'électrification ou des carburants propres comme l'hydrogène et les biocarburants, ce qui entraîne une consommation plus faible de gaz naturel. Les carburants propres, comme les bioénergies et l'hydrogène, pourraient jouer un rôle important en 2050, dépendamment du déploiement des technologies de CSC et de DAC pour réduire les émissions des combustibles fossiles restants comme le gaz naturel et le pétrole. Comme le prévoyait la réglementation fédérale sur l'élimination progressive de la production d'électricité à partir du charbon, tous les scénarios indiquent des valeurs de moins de 140 PJ pour le charbon.

Figure 15 : Scénarios de l'utilisation d'énergie finale par type en 2050



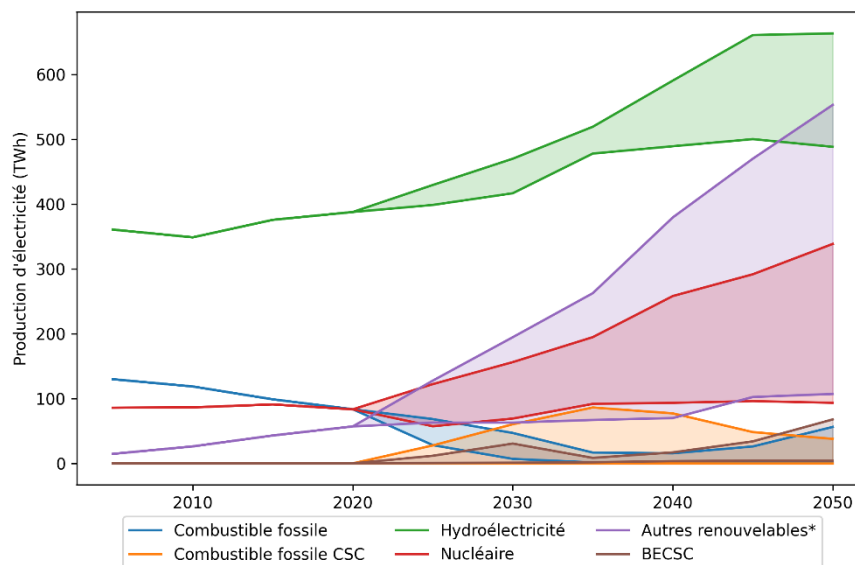
Analyse secteur par secteur

Les différents modèles et scénarios décrivent différentes trajectoires pour chaque secteur. Les quatre secteurs ayant la plus grande incidence sur les émissions (c.-à-d. l'électricité, l'industrie, les bâtiments et les transports) sont décrits en détail ci-dessous.

Production d'électricité

Les résultats sur la production d'électricité pour toutes les trajectoires modélisées sont présentés à la figure 16. Dans tous les scénarios, la production totale d'électricité augmente par rapport aux niveaux de 2020 de 23 % à un maximum de 178 % et l'hydroélectricité joue un rôle très important. En 2020, le Canada avait déjà une importante capacité hydroélectrique de près de 400 TWh¹⁰, mais elle atteindra environ 600 TWh en 2050 dans bon nombre des scénarios de carboneutralité. L'énergie éolienne et l'énergie solaire photovoltaïque connaîtront une hausse importante de leur production de 2020 à 2050, soit de 136 % à 657 % et de 51 % à plus de 3613 % respectivement. Le secteur nucléaire affiche une augmentation comparativement plus faible entre 2020 et 2050, mais il demeure un contributeur important à la production totale d'énergie. Bien qu'une petite partie de l'électricité soit produite à partir de combustibles fossiles avec un maximum de 4 % sans CSC et de 5 % avec CSC d'ici 2050 en général, tous les types de combustibles fossiles contribuent minimalement à la production totale dans tous les scénarios modélisés pour atteindre la carboneutralité.

¹⁰ Ibid.

Figure 16 : Scénarios du portefeuille de production d'électricité au Canada 2005 à 2050

* Les autres énergies renouvelables comprennent la biomasse, le vent, le solaire photovoltaïque, la géothermie et les déchets.

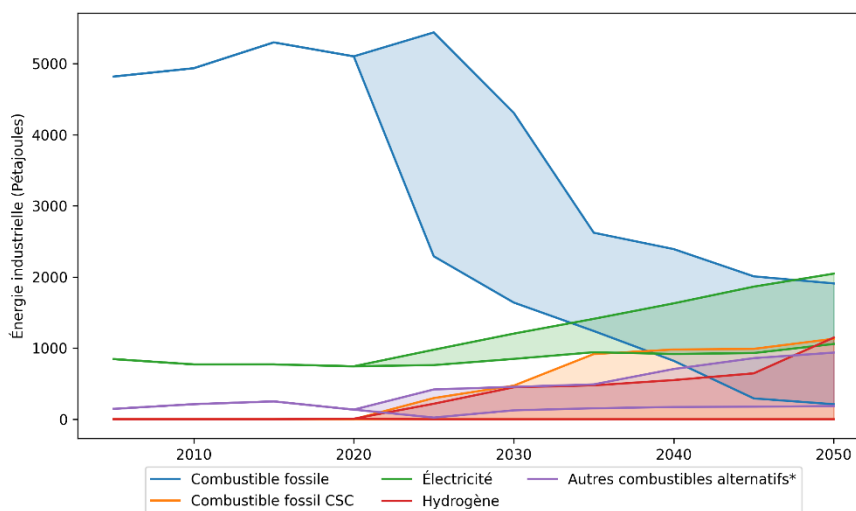
Industrie

Les possibilités de décarbonisation varient d'une industrie à l'autre, car chacune d'elle diffère par ses besoins en matière de chaleur et d'énergie, d'émissions liées aux procédés industriels et d'obstacles technologiques. Certaines industries pourraient grandement bénéficier de l'électrification, de l'amélioration de l'efficacité énergétique, des combustibles alternatifs ou de procédés de remplacement, tandis que d'autres industries, dont les émissions sont plus difficiles à réduire, nécessiteront peut-être le recours à des technologies de captation du CO₂.

Tous les scénarios, comme le montre la figure 17, indiquent une réduction de la consommation d'énergie finale en 2050 par rapport à 2020 pour le secteur industriel du Canada¹¹, avec une diminution de la consommation d'énergie finale de 9 % à 52 % par rapport aux niveaux de 2020, ce qui souligne l'importance de l'efficacité énergétique pour ce secteur. Les résultats de la modélisation du Canada laissent également entrevoir une diminution importante et rapide de la consommation de combustibles fossiles dans le secteur industriel, et ce, dès 2025 dans la plupart des scénarios, avant d'atteindre un plateau vers 2045. L'hydrogène est considéré comme important dans certains scénarios, mais pas dans tous, car il représente de 0 % à 34 % de la consommation d'énergie finale de l'industrie en 2050. D'autres combustibles d'alternatifs, comme la bioénergie et le gaz naturel renouvelable, sont également en croissance, mais jouent un rôle moins important, soit jusqu'à 22 % et 7 % respectivement.

¹¹ Ibid.

Figure 17 : Scénarios de l'utilisation d'énergie finale dans l'industrie 2005 à 2050



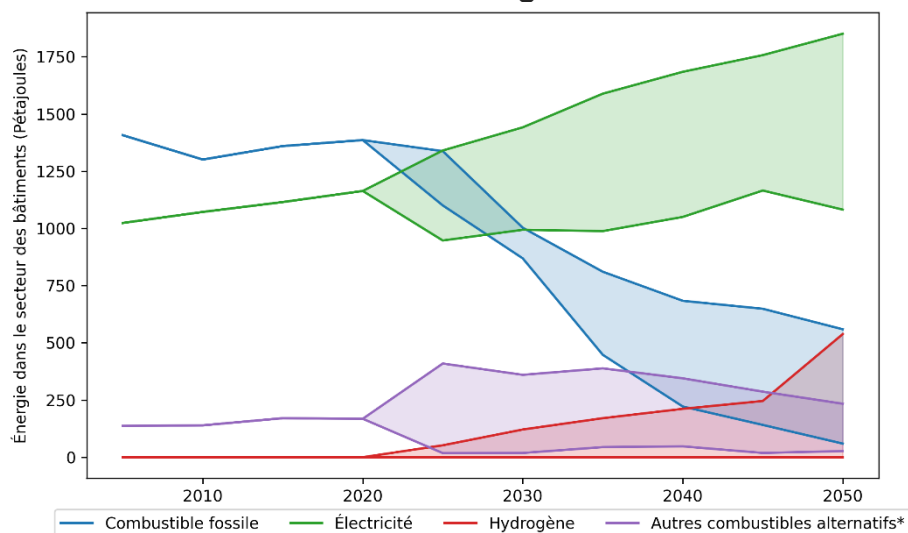
* Les combustibles alternatifs inclus BECSC, les bioénergies et le gaz naturel renouvelable.

Bâtiments

Une caractéristique unique du secteur du bâtiment est la longue durée de vie de nombreux bâtiments, ce qui signifie que les rénovations et l'efficacité énergétique devraient être une des caractéristiques essentielles sur la trajectoire de la décarbonisation. L'électricité pourrait également jouer un rôle clé pour aider ce secteur à réduire ses émissions, car de nombreux services pourraient être électrifiés, comme le chauffage, la climatisation, les appareils électroménagers et d'autres services. De plus, l'électricité peut être beaucoup plus efficace sur le plan énergétique que les combustibles fossiles (p. ex., les thermopompes) et pourrait réduire la quantité totale d'énergie nécessaire pour fournir les mêmes services.

Les résultats de la modélisation (illustrés à la figure 18) montrent les données historiques et la transition énergétiques de l'électricité, de l'hydrogène, des combustibles fossiles et d'autres combustibles alternatifs jusqu'en 2050 dans le secteur du bâtiment. À l'instar du secteur industriel, la consommation totale d'énergie dans le secteur du bâtiment diminuera dans tous les scénarios, avec des réductions en 2050 variant de 21 % à 40 % par rapport aux niveaux de 2020. Il est démontré que la consommation de combustibles fossiles dans le secteur des bâtiments diminue dans tous les scénarios et diminue d'au moins 60 % en 2050 par rapport au niveau de 2020¹². Tel qu'observé dans tous les scénarios, l'électricité devrait être la source principale d'énergie, sa part totale passant d'environ 40 % en 2020 à un intervalle de 63 % à 88 % en 2050. D'autres combustibles comme l'hydrogène et les combustibles alternatifs (p. ex., le gaz naturel renouvelable et la bioénergie) jouent un rôle moins important, mais toujours crucial, avec des parts atteignant jusqu'à 31 % et 13 % en 2050, respectivement.

¹² Ibid.

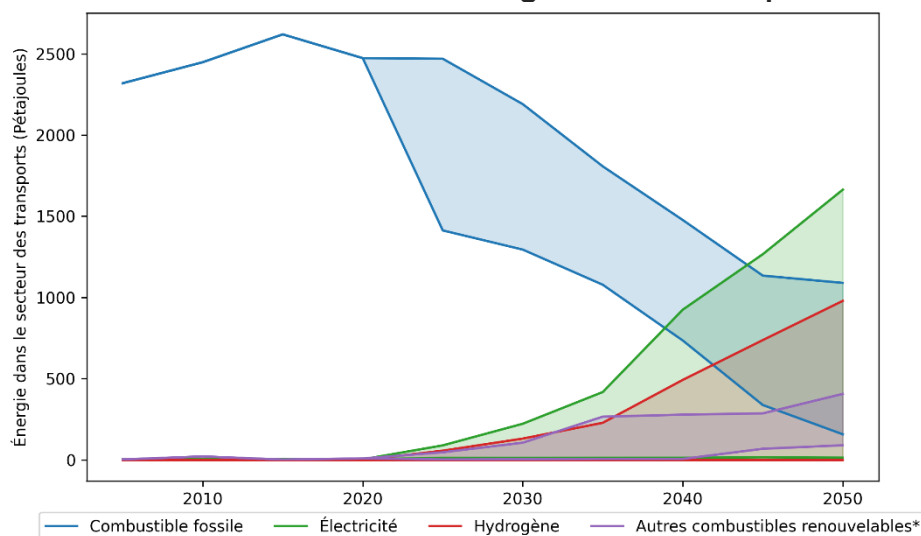
Figure 18 : Scénarios de l'utilisation d'énergie dans les bâtiments 2005 à 2050

* Les combustibles alternatifs incluent BECSC, les bioénergies et le gaz naturel renouvelable.

Transports

Le secteur des transports comprend le transport de passagers et de marchandises, ce qui inclut notamment les véhicules légers, les véhicules moyens et lourds, le transport ferroviaire, aérien, maritime et hors route et les pipelines. Chaque mode de transport a des besoins énergétiques variés et un potentiel d'électrification différent. Lorsque l'électrification n'est pas possible, les combustibles à faible teneur en carbone, comme l'hydrogène et les biocarburants, peuvent soutenir la décarbonisation. Tout comme dans le secteur des bâtiments, l'électricité est plus efficace sur le plan énergétique que les combustibles fossiles pour de nombreux modes de transport.

Les résultats de la modélisation présentés à la figure 19 montrent les données historiques et les changements prévus dans les combustibles fossiles, l'hydrogène, l'électricité et les combustibles alternatifs jusqu'en 2050 dans le secteur des transports. Dans toutes les trajectoires, la consommation totale d'énergie devrait diminuer d'au moins 8 % par rapport aux niveaux de 2020. Dans tous les scénarios modélisés, les combustibles fossiles devraient passer de la principale source d'énergie à une valeur minimale de 8 % de la consommation totale d'énergie dans ce secteur d'ici 2050. L'électricité joue un rôle croissant dans les scénarios modélisés, avec un maximum de plus de 1 600 PJ en 2050, soit 72 % de la consommation totale d'énergie. Dans les scénarios où l'hydrogène est efficace et déployé à grande échelle, ce combustible peut représenter jusqu'à 49 % de l'énergie totale, tandis que les biocarburants peuvent atteindre une part de 30 %.

Figure 19 : Scénarios de l'utilisation d'énergie dans les transports 2005 à 2050

* Les combustibles alternatifs inclus BECSC, les bioénergies et le gaz naturel renouvelable.

Contribution de l'élimination du CO₂

Tous les scénarios démontrent le potentiel des émissions négatives qui consistent à retirer le CO₂ de l'atmosphère (p. ex., ATCATF, capture directe du dioxyde de carbone [DAC] et BECSC). Cependant, selon le scénario, les résultats de modélisation montrent que les émissions sont principalement réduites par l'électrification, les technologies de recharge (avec des rendements plus élevés ou des processus moins émetteurs) ou le changement de combustible plutôt que les technologies à émissions négatives.

Dans chaque scénario, le secteur d'ATCATF a été normalisé pour éliminer 100 Mt d'éq. CO₂ d'ici 2050, ce qui permet plus d'émissions résiduelles dans l'ensemble de l'économie lors de la modélisation. Cependant, même avec les 100 Mt d'émissions éliminées dans tous les projections réalisées sauf deux, le DAC était nécessaire pour atteindre la cible de zéro émission nette. De plus, la BECSC est apparue dans tous les scénarios avec un intervalle de 16 à 73 Mt d'émissions éliminées. Dans les deux scénarios qui ne reposaient pas sur le DAC, des niveaux plus élevés de BECSC sont apparus.

Principaux points à retenir

La modélisation de la stratégie à long terme du Canada démontre, premièrement, que l'électrification généralisée des secteurs comme l'industrie, les bâtiments et les transports sera probablement essentielle pour atteindre la carboneutralité. Pour ce faire, il faudra augmenter considérablement la production d'électricité à partir de sources non émettrices (p. ex., hydroélectricité, énergie éolienne, solaire et nucléaire). Deuxièmement, les mesures d'efficacité énergétique, au-delà de l'électrification de l'ensemble de l'économie, seront probablement cruciales, la consommation totale d'énergie dans l'industrie, les bâtiments et les transports diminuant dans tous les scénarios, malgré une croissance de la population et de la production. Troisièmement,



les combustibles renouvelables et alternatifs, comme la bioénergie et l'hydrogène, pourraient jouer un rôle important dans la trajectoire vers la carboneutralité, notamment dans les secteurs difficiles à électrifier, même si l'électricité sera probablement plus importante que ces combustibles dans la plupart des scénarios. Quatrièmement, la demande de combustibles fossiles au Canada diminue dans tous les scénarios. Enfin, les résultats de modélisation suggèrent que l'utilisation de technologies d'émissions négatives a un rôle à jouer dans un contexte de carboneutralité. Les émissions résiduelles sont susceptibles de se produire dans des secteurs comme le transport et l'industrie, qui sont plus difficiles à décarboniser. Pour compenser ces émissions, la combinaison des technologies de captations tel que la BECCS et du DAC sont jugées essentielles dans tous les scénarios modélisés, à l'exception de deux trajectoires qui pourraient d'atteindre la carboneutralité sans le DAC.

Prochaines étapes vers la carboneutralité au Canada

Ces scénarios illustrent les nombreuses façons dont le Canada peut atteindre son objectif de carboneutralité d'ici 2050. Cependant, certaines conditions habilitantes, comme l'énergie renouvelable, l'électrification et l'efficacité énergétique, jouent un rôle clé dans tous les scénarios, et le Canada travaille à les faire progresser au moyen de plusieurs mesures et stratégies. À l'avenir, de nombreux facteurs nationaux et internationaux pourraient modifier la trajectoire du Canada vers la carboneutralité. Par exemple, la croissance de la population et du PIB du Canada joueront toutes deux un rôle important dans la détermination de la trajectoire du Canada vers la carboneutralité. Des facteurs internationaux, comme l'ampleur de l'action mondiale collective sur les changements climatiques, la demande et le prix du pétrole à l'échelle mondiale et le rythme des progrès technologiques, auront également une grande incidence sur la trajectoire du Canada.



Groupe consultatif pour la carboneutralité du Canada

Le Groupe consultatif pour la carboneutralité (GCPC) est un groupe légiféré d'experts qui ont des antécédents pertinents et qui fournissent des conseils indépendants prospectifs aux gouvernements actuels et futurs en ce qui concerne l'atteinte de la carboneutralité au cours des trois prochaines décennies. Il a également pour mandat de mener des activités de mobilisation liées à l'atteinte de la carboneutralité. Le GCPC s'est engagé à faire preuve de transparence quant à ses activités et à ses conseils indépendants et doit présenter un rapport annuel sur ses conseils et activités, qui doit être rendu public.

Les membres du GCPC rassemblent un large éventail d'expertise dans les domaines de la science du climat, des connaissances autochtones, des sciences sociales et de l'économie, des technologies propres, des marchés de l'énergie et de la politique climatique. Le premier groupe de membres, qui proviennent de partout au Canada, élabore activement des conseils depuis février 2021. En juin 2021, le GCPC a publié un résumé des observations initiales sur les voies de transition que le GCPC considère comme les plus susceptibles pour que le Canada atteigne la carboneutralité d'ici 2050. Le rapport identifie cinq valeurs fondamentales (saisir tous les avantages possibles, placer les individus au premier plan, motiver et responsabiliser les Canadiens, collaborer à chaque étape du processus, et reconnaître et respecter les différences et les particularités régionales) et cinq principes de conception (Agir tôt et de façon urgente, être audacieux et proactif, reconnaître qu'il y a plus de certitude que d'incertitude, ne pas se faire avoir par la notion de « neutralité » et faire attention aux impasses) pour guider l'élaboration des voies vers la carboneutralité. En février 2022, le GCPC a fourni des conseils sur le PRE pour 2030 du Canada. Il était axé sur quatre domaines clés : le pétrole et le gaz, les transports, les bâtiments et la gouvernance. Les conseils du GCPC ont été intégrés au PRE pour 2030 et continuent de guider les efforts fédéraux.

Au cours de la prochaine phase de ses travaux, le GCPC approfondira les considérations complexes nécessaires pour éclairer des conseils stratégiques plus précis à l'avenir. En particulier, le travail du GCPC doit être structuré selon des « champs d'enquête » précis, qui peuvent inclure certains secteurs ou des possibilités thématiques. De plus amples renseignements sur les activités actuelles et les plans prospectifs du GCPC sont disponibles sur son site Web : <https://gcpc2050.ca/>.

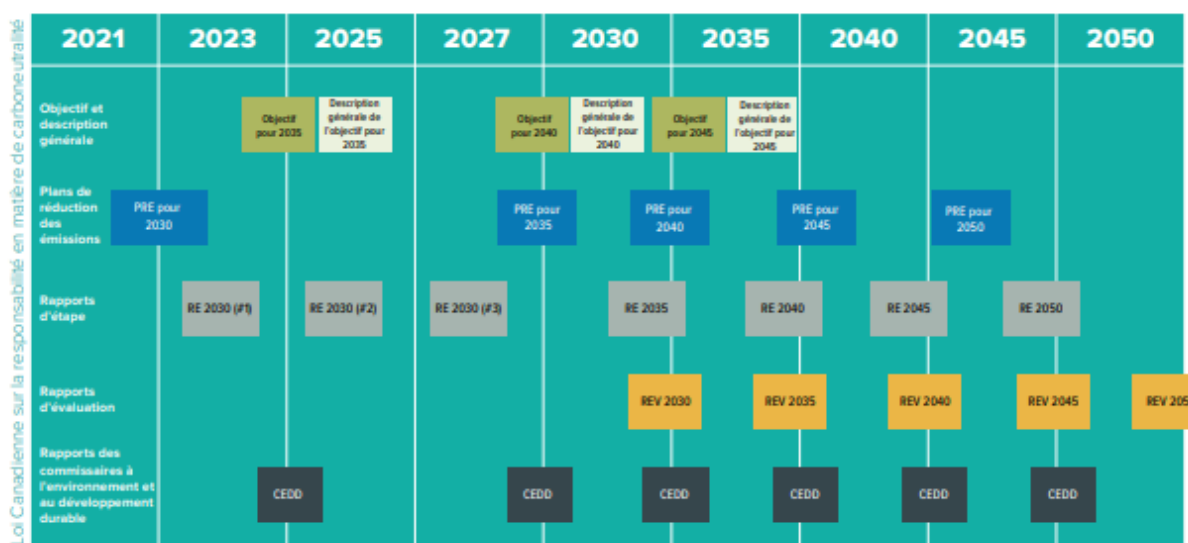
Le Canada a pris des mesures pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050. En juin 2021, le Canada s'est engagé dans la loi à réduire les émissions à des niveaux nets zéro d'ici 2050, par l'entremise de la *Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité* (la Loi). La Loi codifie le processus d'établissement des cibles nationales de réduction des émissions et introduit des mécanismes de planification et de production de rapports pour promouvoir la transparence et la responsabilisation dans l'atteinte de ces cibles. De plus, la Loi établit le Groupe consultatif pour la carboneutralité, un groupe d'experts indépendant dont le mandat est de consulter les Canadiens et de formuler des conseils au ministre de l'Environnement et du Changement climatique sur les trajectoires à suivre pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050.

La Loi exige l'établissement de cibles de réduction des émissions plus importantes successivement pour 2030, 2035, 2040 et 2045, et le dépôt d'un plan de réduction des émissions (PRE) pour chaque cible, y compris la cible de 2050. La Loi exige que le ministre de l'Environnement et du Changement climatique fixe les cibles à venir pour 2035, 2040 et 2045 au moins 10 ans à l'avance. Conformément à la Loi, le gouvernement du Canada devra également fournir des mises à jour en 2023, 2025 et 2027 au moyen de rapports d'étape et de rapports d'évaluation.



La Loi oblige également le gouvernement du Canada à rendre des comptes puisqu'elle trace la voie à suivre pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050. Pour ce faire, elle établit un processus transparent pour planifier, évaluer et ajuster les efforts que le gouvernement fédéral déploie pour atteindre, à intervalles réguliers, des cibles nationales de réduction des émissions de gaz à effet de serre fondées sur les meilleures données scientifiques disponibles et en prévoyant la participation du public ainsi que des conseils au sujet de ces efforts et des examens indépendants de ceux-ci. Le gouvernement du Canada tiendra compte de ces conseils au moment d'établir des cibles d'émissions et des plans de réduction des émissions. Les travaux du Groupe consultatif pour la carboneutralité, ainsi que la mobilisation supplémentaire des provinces et des territoires, des peuples autochtones et du public, orienteront les trajectoires du Canada vers l'atteinte de la carboneutralité d'ici 2050.

Figure 20 : Jalons de la Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité



La Loi comprend des mesures précises pour l'examen par des tiers, la prestation de conseils indépendants et la diffusion publique de rapports et de plans pour veiller à ce que les Canadiens aient l'information dont ils ont besoin pour tenir le gouvernement responsable. Le commissaire à l'environnement et au développement durable (CEDD) doit, au moins une fois tous les cinq ans, examiner la mise en œuvre par le gouvernement des mesures d'atténuation des changements climatiques, y compris celles prises pour atteindre chaque cible, et en faire rapport. Le premier rapport du CEDD doit être présenté au plus tard à la fin de 2024. Tous les rapports d'étape et d'évaluation, les plans de réduction des émissions et le rapport annuel du GCPC doivent être mis à la disposition du public.



4. Conclusion

Les données scientifiques sont claires : l'atteinte de réductions importantes des émissions d'ici 2030 et de la carboneutralité d'ici 2050 est essentielle pour limiter le réchauffement à 1,5 °C et éviter les risques graves liés au climat. Le Canada prend les choses en main et jette les bases pour soutenir les trajectoires vers 2050, notamment en adoptant un objectif de réduction des émissions de 40 à 45 % par rapport aux niveaux de 2005 d'ici 2030 en tant que contribution déterminée au niveau national renforcée, et en inscrivant dans la législation son engagement à atteindre la carboneutralité d'ici 2050 par le biais de la *Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité*.

Pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050, il faudra transformer en profondeur tous les secteurs de l'économie canadienne, surtout la façon dont l'énergie est produite et consommée. Bien qu'une grande partie de cette transition puisse être réalisée grâce à la technologie actuelle, des investissements importants dans la recherche, le développement, la démonstration et le déploiement, ainsi que des innovations continues, seront nécessaires.

Il n'y a pas d'approche universelle pour atteindre la carboneutralité et bien que la route vers 2050 comporte de nombreuses possibilités, mais elle est également incertaine. La trajectoire du Canada jusqu'en 2050 sera influencée par des facteurs externes, tels que la disponibilité des technologies émergentes clés et le contexte mondial. La décarbonisation de l'économie permettra au Canada de soutenir la compétitivité des secteurs traditionnels dans un marché mondial décarbonisé en tirant parti de notre expertise et les ressources dans des secteurs tels que les minéraux critiques.

Le gouvernement de Canada continuera de régulièrement examiner et mettre à jour sa démarche pour tenir compte de l'évolution des circonstances et des meilleures données scientifiques disponibles, appuyé par une collaboration continue avec les communautés, provinces, les territoires et les peuples autochtones. Bien que la trajectoire de la transition doive être adaptée pour répondre aux besoins uniques des diverses juridictions du Canada, la direction et l'orientation sont claires, et le Canada est en train de mettre en place les éléments de base pour y parvenir.



ANNEXE : Annexe de Modélisation

A. Modèles et détails des hypothèses

Dans la modélisation de Vision 2050, il existe plusieurs hypothèses communes concernant le contexte international et national dans l'atteinte de la carboneutralité d'ici 2050. Cette annexe fournit des informations supplémentaires sur les hypothèses contextuelles ainsi que des informations techniques sur chaque modèle utilisé et leurs hypothèses.

Hypothèses internationales et nationales

Dans tous les scénarios et modèles, le Canada est tenu d'atteindre ou de surpasser la carboneutralité d'ici 2050, ainsi que sa contribution déterminée à l'échelle nationale (CDN) de l'Accord de Paris de 40 % par rapport aux niveaux de 2005 d'ici 2030. On suppose que l'ATCATF captera au net 30 MtCO₂e en 2030 et 100 MtCO₂e en 2050. Ces hypothèses sont conformes au PRE 2030 et à l'annexe 1 de la [stratégie visant l'horizon milieu du siècle du Canada](#) en 2016. L'ICC a utilisé un potentiel de compensation similaire de l'ATCATF dans son [rapport](#) sur l'atteinte de la carboneutralité d'ici 2050, avec 80 MtCO₂e en 2030 et 105 MtCO₂e en 2050. Comme les modèles sont illustratifs pour 2050, il convient de noter que l'hypothèse de l'ATCATF n'est pas un objectif politique qui reflète l'impact prévu de l'ATCATF dans l'atteinte des objectifs climatiques du Canada. De plus, la contribution précise que l'ATCATF apportera à l'objectif de carboneutralité du Canada est incertaine et est susceptible de changer à mesure que des analyses plus détaillées seront entreprises.

Étant donné que le Canada est une petite économie ouverte, les hypothèses et les cadres internationaux ont des effets sur les secteurs industriels et de la production de ressources énergétiques du Canada. Les modèles de Vision 2050 utilisent les CDN des autres pays comme base d'hypothèses internationales et nationales. À l'instar du Canada, les pays sont contraints d'atteindre ou de dépasser leurs CDN. À des fins de modélisation, les pays ou les régions qui ont des engagements explicites de carboneutralité atteignent leur objectif au cours de l'année annoncée. L'année cible pour la carboneutralité est pour la plupart des pays 2050. Pour les pays qui n'ont pas d'objectif de carboneutralité, on suppose que leurs objectifs post-CDN seront atteints par extrapolation linéaire. La tableau 2 montre les engagements des membres du G20 en matière d'atténuation des GES pour les CDN de 2030 et l'atteinte de l'objectif de la carboneutralité. Des cibles intermédiaires sont également incluses dans cet exercice. Dans le contexte de l'atteinte de la carboneutralité, les émissions de GES peuvent être inférieures aux objectifs intermédiaires annoncés. Afin de contraindre les régions à leurs CDN, une tarification du carbone ou un plafond d'émissions par région est utilisé.

Tableau 1: Sommaire des engagements d'atténuation des GES par les membres du G20

Membres du G20	Engagement CDN	
	Engagement 2030	Année cible carboneutralité
États-Unis d'Amérique	Réduire les émissions de GES de 50% à 52% par rapport aux niveaux de 2005 d'ici 2030	2050
Canada	Réduire les émissions de GES de 40% à 45% par rapport aux niveaux de 2005 d'ici 2030	2050



Royaume-Uni	Réduire les émissions de GES de 68% par rapport aux niveaux de 1990 d'ici 2030	2050
UE27	Réduire les émissions nettes de GES de 55% par rapport aux niveaux de 1990 d'ici 2030	2050
République de Corée	Réduire les émissions de GES de 35 % par rapport aux niveaux de 2018 d'ici 2030	2050
Japon	Réduire les émissions de GES de 46 % par rapport aux niveaux de 2013 d'ici 2030, avec des efforts pour réduire de 50 %	2050
Chine	Sommet des émissions de CO ₂ avant 2030 Réduire le ratio CO ₂ /PIB de 65 % par rapport aux niveaux de 2005 d'ici 2030 Augmenter la part des énergies autres que combustibles fossiles dans la consommation d'énergie primaire à environ 25 % d'ici 2030 Augmenter le volume du stock forestier d'environ 6 milliards de mètres cubes en 2030 Augmenter la capacité installée d'énergie éolienne et solaire à 1 200 GW d'ici 2030	2060
Australie	Réduire les émissions de GES de 26 % à 28 % par rapport aux niveaux de 2005 d'ici 2030	2050
Russie	Réduire les émissions de GES de 30 % par rapport aux niveaux de 1990 d'ici 2030	2060
Inde	Réduire le ratio émissions/PIB de 33 % à 35 % par rapport aux niveaux de 2005 d'ici 2030 Augmenter la part des énergies autres que combustibles fossiles dans la production d'électricité primaire à 40 % (conditionnel)	2070
Brésil	Réduire les émissions de GES de 43 % par rapport aux niveaux de 2005 d'ici 2030	2050
Mexique	Réduire les émissions de GES de 22 % (inconditionnel) et de 36 % (conditionnel) par rapport au scénario du "laisser faire" d'ici 2030	N/A
Argentine	Plafonner les émissions nettes de 2030 à 359 MtCO ₂ e (inconditionnel)	2050
Indonésie	Réduire les émissions de GES de 29 % (inconditionnel) et de 41 % (conditionnel) par rapport au scénario du "laisser faire" d'ici 2030	2060
Afrique du Sud	Limiter les émissions de 2030 à 350 à 420 MtCO ₂ e	2050
Arabie Saoudite	Réduire annuellement jusqu'à 130 MtCO ₂ e d'ici 2030	2060
Turquie	Réduire les émissions de GES jusqu'à 21 % par rapport au scénario du "laisser faire" d'ici 2030	2053



Sources : climateactiontracker.org and <https://www.unep.org/fr/resources/emissions-gap-report-2021>

La modélisation de Vision 2050 utilise trois modèles internationaux car ils reflètent les mesures d'atténuation prises par la communauté mondiale et l'impact de ces mesures sur le commerce international. Étant donné que le Canada est une petite économie ouverte, la modélisation endogène de la façon dont les partenaires commerciaux du Canada et la communauté mondiale répondent à l'impératif de réduire leurs émissions et donne un aperçu plus clair quant au potentiel de diverses trajectoires pour réduire les émissions au Canada.

Global Change Analysis Model (GCAM)

[Global Change Analysis Model](#) (GCAM) est un modèle d'évaluation intégré publique qui saisit les principales interactions entre les systèmes économiques, énergétiques, d'utilisation des terres, agricoles, hydriques et climatiques mondiaux. Le modèle a été créé par Edmonds et Reilly en 1985¹³. Aujourd'hui, le modèle est principalement développé et maintenu par le Joint Global Change Research Institute (JGCRI) et une description complète du modèle est disponible sur [GitHub](#).

GCAM représente une classe de modèle d'équilibre partiel dynamique récursif exécuté avec des intervalles de cinq ans, avec 2015 comme dernière année historique. Le modèle répartit le monde en 32 régions (avec le Canada comme région distincte) et 384 sous-régions hydrauliques et terrestres définies le long des bassins hydrologiques¹⁴. Les systèmes énergétiques et terrestres sont reliés dans le modèle par le biais de l'offre et de la demande du marché des bioénergies et des engrais azotés. Les émissions de sources anthropiques provenant des systèmes énergétiques et terrestres sont intégrés à un modèle climatique de format réduit appelé Hector¹⁵.

Le modèle utilise la croissance de la population et de la productivité du travail comme principaux moteurs des activités socio-économiques qui sont prescrits de manière exogène. Ces indicateurs socio-économiques influencent le mécanisme de l'offre et de la demande pour les produits énergétiques et agricoles (par exemple, la nourriture, les aliments pour animaux et la foresterie) par le biais des interactions entre les secteurs ([Joint Global Change Research Institute \(umd.edu\)](#)). Les secteurs de GCAM couvrent des technologies alternatives qui se concurrencent sur la base de plusieurs facteurs tels que leurs coûts, leurs efficacités, leur efficacité climatique (par exemple, l'intensité des émissions dans le cadre de politique climatique) et les comportements des consommateurs (c'est-à-dire les élasticités de revenu et de prix).

Le système énergétique du modèle comprend une représentation régionale des ressources non-renouvelables (charbon, pétrole, gaz naturel et uranium) et renouvelables (bioénergie, solaire et éolienne). Les ressources non-renouvelables et bioénergétiques sont échangeables sur les marchés mondiaux. Les secteurs de transformation de l'énergie, tels que la production d'électricité, le raffinage des produits pétroliers et bioénergétiques, le traitement du gaz et la production d'hydrogène, sont utilisés pour convertir les ressources primaires en produits énergétiques finaux. Ces produits énergétiques finaux sont utilisés pour produire des services énergétiques dans les secteurs du transport, du bâtiment et de l'industrie.

¹³ Edmonds et Reilly, 1985

¹⁴ Calvin et al., 2019

¹⁵ Hartin et al., 2015



Le déploiement des technologies dans les systèmes énergétiques et autres systèmes humains de GCAM est déterminé par le coût relatif ainsi que par les préférences des consommateurs pour les technologies établies, lesquelles sont basées sur les tendances historiques. La prise de décision économique est basée sur la formulation d'un choix discret (logit), qui permet une distribution de conditions hétérogènes dans le monde réel et évite les résultats irréalistes du type "winner-takes-all"¹⁶. Pour chaque intervalle de temps, le modèle recherche des prix d'équilibre qui équilibrent l'offre et la demande sur les marchés de l'énergie, des terres et des émissions dans chaque région modélisée. Les prix des biens et les niveaux de production régionaux sont ainsi déterminés de manière endogène.

Calibration Base de données et calibration du modèle GCAM

GCAM est calibré sur un ensemble de données sur la demande de biens cohérent avec les données de l'offre pour chaque période historique et toutes les régions spécifiées. Le modèle utilise ces données entre l'offre et la demande de biens ainsi qu'un ensemble d'hypothèses de coût et de prix pour calculer l'équilibre du marché pour chaque intervalle de temps dans les périodes historiques. Étant donné sa nature récursive, GCAM utilise la solution de la dernière année de base comme valeurs initiales pour calibrer sa première période future, puis répète le même mécanisme pour les périodes suivantes.

Bien que le JGCRI fournisse des informations détaillées sur les bases de données et les hypothèses utilisées dans la [version publiée du modèle GCAM](#), une brève description des données et des sources utilisées pour la calibration du modèle est présentée dans le tableau 1. La Stratégie à Long Terme (SLT) du Canada a utilisé une version modifiée du modèle GCAM v5.3 en incorporant l'offre et de la demande historique canadienne aligné avec le scénario de [référence 21](#) d'Environnement et Changement Climatique Canada (c.-à-d. Ref21), lequel est préparé par le modèle E3MC (tableau 1). La version du modèle GCAM d'ECCC possède également certaines caractéristiques supplémentaires liées à la production d'électricité hydroélectrique¹⁷, aux technologies canadiennes de production de pétrole non conventionnel¹⁸. En utilisant 2015 (dernière année historique) comme année de base, le modèle se calibre pour les périodes futures par intervalle de 5 ans jusqu'en 2100.

¹⁶ Clarke et Edmonds, 1993 ; McFadden, 1980 ; Train, 1993

¹⁷ Arbuckle et al., 2021

¹⁸ Bergero, M et al., 2022



Tableau 2 : Base de données GCAM et informations sur les paramètres

Systèmes de GCAM	Régions	Indicateurs	Sources/Références
Socio-économique	Autres régions	Population	- United Nation, Maddison, SSP database - USDA, World Bank, IMF, SSP database, OECD Model http://jgcri.github.io/gcam-doc/inputs_economy.html
		PIB	
	Canada	Population	- Tableau 17-10-0057-01 de Statistique Canada (M1 : scénario de croissance moyenne: Population projetée, selon le scénario de projection, l'âge et le sexe, au 1er juillet (statcan.gc.ca)) et projection démographique d'E3MC - Tableau 36-10-0222 de Statistique Canada (Produit intérieur brut, en termes de dépenses, provinciaux et territoriaux, annuel (statcan.gc.ca)) et scénario de référence d'E3MC (Ref21)
		PIB	
Énergie (données historiques)	Autres régions	Balance de l'offre et de la demande d'énergie	- Données de l'International Energy Agency (IEA) de 2019 utilisées pour l'historique avec la dernière année historique du modèle en 2015 http://jgcri.github.io/gcam-doc/inputs_demand.html
	Canada		- Projections du scénario de référence (Ref21) d'E3MC à Environnement et Changement Climatique Canada - Projections des émissions de gaz à effet de serre (canada.ca) http://jgcri.github.io/gcam-doc/inputs_demand.html#food-feed-forestry
Nourriture, alimentation animale et forêt	Toutes les régions	Base de données historiques sur les produits agricoles et d'élevage et les produits forestiers	http://jgcri.github.io/gcam-doc/inputs_demand.html#food-feed-forestry
Territoire	Toutes les régions	Données historiques sur l'utilisation et la couverture des sols	- Moirai Land Data System (Moirai LDS) http://jgcri.github.io/gcam-doc/inputs_land.html https://github.com/JGCRI/moirai
Production d'électricité	Toutes les régions	Coût du capital	- Annual Technology Baseline 2019 http://jgcri.github.io/gcam-doc/inputs_supply.html#energy
		Autres coûts, efficacité, facteurs de capacité	Muratori, M., Ledna, C., McJeon, H., et al. 2017. Cost of power or power of cost: A U.S. modeling perspective. Renewable and Sustainable Energy Reviews 77, pp. 861-874
Hydrogène	Toutes les régions	Structure de la production d'hydrogène	- U.S. Department of Energy. 2015. DOE H2A Production Analysis, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program http://jgcri.github.io/gcam-doc/v5.3/energy.html#doe2015 - Argonne National Laboratory, 2015, Hydrogen delivery scenario analysis model (HDSAM), Argonne National Laboratory http://jgcri.github.io/gcam-doc/details_energy.html#anl2015
Bâtiment	Toutes les régions	Système de chauffage et de refroidissement et demande d'énergie	- Clarke, L., Eom, J., Hodson Marten, E., et al. 2018. Effects of long-term climate change on global building energy expenditures. Energy Economics 72, pp. 667-677 http://jgcri.github.io/gcam-doc/v5.3/energy.html#clarke2018
	Toutes les régions	Demande historique du secteur du bâtiment par type d'énergie	International Energy Agency (IEA) 2019
	Canada		Aligné sur le scénario de référence 21 d'E3MC de l'Environnement et Changement Climatique Canada
Industrie	Toutes les régions	Demande historique d'énergie dans l'industrie	- International Energy Agency (IEA) 2019 http://jgcri.github.io/gcam-doc/v5.3/energy.html#clarke2018
	Canada		Aligné sur le scénario de référence 21 d'E3MC d'ECCC
	Toutes les régions	Données sur les hypothèses pour le secteur du transport	Mishra, G.S., Kyle, P., Teter, J., Morrison, G.M., Kim, S., and Yeh, S. 2013. Transportation Module of Global Change Assessment Model (GCAM): Model Documentation, Research Report



Transport			UCD-ITS-RR-13-05, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis. • http://iqcri.github.io/qcam-doc/v5.3/energy.html#mishra2013 • International Energy Agency (IEA) 2019
	Toutes les régions	Demande historique par type d'énergie et par mode	
	Canada		• Aligné sur le scénario de référence 21 d'E3MC de l'Environnement et Changement Climatique Canada
Émissions non-CO ₂	Toutes les régions	Coût marginal de réduction des émissions non-CO ₂ (CMR)	• US EPA, 2013, Global Mitigation of Non- CO ₂ Greenhouse Gases: 2010-2030. EPA-430-R-13-011, United States Environmental Protection Agency, Office of Atmospheric Programs • https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-06/documents/mac_report_2013.pdf , http://iqcri.github.io/qcam-doc/v5.3/emissions.html#epa2013

Principales informations du modèle et hypothèses sectorielles

Paramètres socio-économiques

Indicateurs socio-économiques du Canada utilisés							
Indicateurs	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
PIB (TCM) en milliards USD 2015*	2,12	2,46	2,70	2,97	3,30	3,60	3,93
Population en millions d'habitants	38,01	40,11	42,29	44,36	46,36	47,50	48,64

* La conversion de 1990 à 2015 est effectuée à partir des données suivantes:
<https://fred.stlouisfed.org/series/USAGDPDEFAISMEI>

Secteur de la production d'électricité

Hypothèses de coûts d'investissement pour les technologies de production d'électricité (2015 US\$/kW)				
Technologie	2020	2030	2040	2050
Biomasse (conv)	3657	3513	3397	3303
Biomasse (CCGI)	5384	4994	4675	4415
Biomasse (conv CSC)	6886	6352	5914	5556
Biomasse (CCGI CSC)	7844	7104	6503	6009
Charbon (conv pul)	3506	3411	3334	3271
Charbon (CCGI)	3692	3485	3334	3218
Charbon (CCGI CSC)	5984	5472	5096	4819
Charbon (conv pul CSC)	5370	5222	5089	4966
Gaz (CC)	920	825	779	762
Gaz (CC CSC)	2025	1885	1783	1709
Gaz (vapeur/TC)	839	800	776	765
Liquides raffinés (CC)	920	825	779	762
Liquides raffinés (vapeur/TC)	839	800	776	765
Liquides raffinés (CC CSC)	2397	2218	2085	1983
Gen_II_REL	5980	5980	5980	5980
Gen_III	5879	5682	5503	5345
CSP_stockage	6440	4640	3766	3345
PV_stockage	5380	3759	2885	2411
CSP	3755	2632	2144	1930



PV	1678	1056	842	765
Éolienne	1425	1211	1081	1004
Éolienne_offshore	3338	2530	2050	1762
Éolienne_stockage	5005	3776	3043	2604
Toiture_pv	2678	1628	1260	1134
Géothermique	4391	3955	3668	3475
Hydroélectricité	2239	2239	2239	2239

Hypothèses de coûts fixes d'O&M des technologies de production d'électricité (2015 US\$/kW per yr)

Technologie	2020	2030	2040	2050
Biomasse (conv)	102	100	98	96
Biomasse (CCGI)	146	135	128	122
Biomasse (conv CSC)	123	118	114	111
Biomasse (CCGI CSC)	175	161	151	144
Charbon (conv pul)	27	26	26	25
Charbon (CCGI)	36	34	32	31
Charbon (CCGI CSC)	71	64	59	56
Charbon (conv pul CSC)	52	48	45	43
Gaz (CC)	11	10	10	10
Gaz (CC CSC)	21	19	18	17
Gaz (vapeur/TC)	12	10	10	10
Liquides raffinés (CC)	11	10	10	10
Liquides raffinés (vapeur/TC)	11	10	10	10
Liquides raffinés (CC CSC)	24	22	21	20
Gen_II_REL	103	103	103	103
Gen_III	102	100	98	96
CSP_stockage	65	22	52	49
PV_stockage	50	46	44	42
CSP	54	47	43	40
PV	42	39	37	35
Éolienne	54	52	51	50
Éolienne_offshore	128	119	112	107
Éolienne_stockage	64	62	60	59
Toiture_pv	62	58	55	52
Géothermique	107	105	103	101
Hydroélectricité	15	16	16	16

Hypothèses de coûts variables d'O&M des technologies de production d'électricité (2015 US\$/kW per yr)

Technology	2020	2030	2040	2050
Biomasse (conv)	11	10	10	10
Biomasse (CCGI)	16	15	14	13
Biomasse (conv CSC)	14	13	13	12
Biomasse (CCGI CSC)	19	17	16	15
Charbon (conv pul)	4	4	4	4
Charbon (CCGI)	7	6	6	6
Charbon (CCGI CSC)	10	9	9	8
Charbon (conv pul CSC)	8	8	7	7
Gaz (CC)	4	4	4	4
Gaz (CC CSC)	7	7	6	6
Gaz (vapeur/TC)	7	6	6	6



Liquides raffinés (CC)	4	4	4	4
Liquides raffinés (steam/TC)	6	6	6	6
Liquides raffinés (CC CSC)	9	8	7	7
Gen_II_REL	2	2	2	2
Gen_III	2	2	2	2

Production d'hydrogène

Hypothèses de coûts par technologie pour la production d'hydrogène (2015 US\$/GJ)					
Secteur	Sous-secteur	Technologie	2030	2040	2050
Production centrale d'H2	Hydro	Électrolyse*	14	14	14
Production centrale d'H2	Biomasse	Biomasse vers H2	10	9	9
Production centrale d'H2	Biomasse	Biomasse vers H2 CSC	13	12	11
Production centrale d'H2	Charbon	Charbon Charbon chimique	10	9	9
Production centrale d'H2	Charbon	Charbon Charbon chimique CSC	13	12	11
Production centrale d'H2	Gaz	Reformage à la vapeur du gaz naturel	3	3	3
Production centrale d'H2		Reformage à la vapeur du gaz naturel CSC*	4	4	4
Production centrale d'H2	Nucléaire	Fractionnement thermique	25	25	25
Production centrale d'H2	Solaire	Électrolyse	26	26	26
Production centrale d'H2	Éolienne	Électrolyse	26	26	26
Distribution d'H2	Distribution d'h2	Distribution d'H2	20	20	19
Production d'H2 forecourt	Électricité	Électrolyse	26	26	26
Production d'H2 forecourt		Reformage à la vapeur du gaz naturel	21	19	18

Le coût du GN-CSC et de l'électrolyse à base d'hydrogène est ajusté en fonction des " Perspectives sur l'hydrogène ". <https://aperc.or.jp/file/2018/9/12/Perspectives+on+Hydrogen+in+the+APEC+Region.pdf> dans la région APEC "

Secteur du transport

Hypothèses relatives au coût et à l'intensité dans le secteur du transport de passagers										
Mode	Technologie	Facteur de charge (charge/veh)	CAPEX et OPEX hors carburant (2015 US\$/pass-km)				Intensité énergétique des nouveaux véhicules (MJ/vkm)			
			2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Voiture	VEB	1,68	1,55	0,95	0,67	0,51	0,69	0,60	0,60	0,60
	VEPC	1,68		1,16	0,74	0,57		0,86	0,86	0,86
	Hybride	1,68	1,31	1,17	1,17	1,17	1,86	0,94		
	VMCI	1,68	1,22	1,22	1,22	1,22	2,32	1,18		
Grande voiture et camion	VEB	1,84	1,70	1,10	0,78	0,59	0,87	0,75	0,75	0,75
	VEPC	1,84		1,15	0,83	0,64		1,08	1,08	1,08
	Hybride	1,84	1,38	1,34	1,33	1,32	2,33	1,15		
	VMCI	1,84	1,28	1,28	1,28	1,28	2,96	1,45		

Hypothèses relatives aux coûts et à l'intensité dans le secteur du transport de marchandises										
Mode	Technologie	Facteur de charge (/veh)	CAPEX et OPEX hors carburant (2015 US\$/pass-km)				Intensité énergétique des nouveaux véhicules (MJ/vkm)			
			2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Camion léger	VEB	0.68		3.26	3.19	3.11		1.51	1.48	1.44



Camion moyen	VEPC	0,68		3,18	3,15	3,11		2,03	2,00	1,96
	VMCI	0,68	2,81	2,78	2,78	2,78	4,02	3,68		
	VEB	4,88		3,48	3,39	3,31		3,32	3,32	3,32
	VEPC	4,88		3,38	3,35	3,31		4,47	4,47	4,47
	VMCI	4,88	3,20	2,92	2,92	2,92	9,58	8,23		
Camion lourd	VEB	10		5,00	4,42	3,85		6,54	6,36	6,21
	VEPC	10		3,95	3,82	3,70		8,36	8,27	8,17
	VMCI	10	3,35	3,35	3,35	3,35	11,66	11,52		

Secteur des bâtiments

Hypothèses de coût et d'efficacité de la technologie pour le secteur des bâtiments commerciaux										
Services	Technologie	Coût de la technologie (2015\$/GJ)				Efficacité de la technologie				
		2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050	
Chauffage	Fornaise à bois	3,47	3,47	3,47	3,47	0,40	0,40	0,41	0,41	
	Fornaise au charbon	3,47	3,47	3,47	3,47	0,50	0,50	0,51	0,52	
	Fornaise à gaz	5,39	5,39	5,39	5,39	0,79	0,82	0,84	0,86	
	Fornaise à gaz mélangé avec H2	0,00	8,04	7,90	7,90	0,00	2,24	2,34	2,39	
	Fornaise électrique	4,49	4,49	4,49	4,49	0,94	0,96	0,97	0,98	
	Thermopompe électrique	0,00	23,98	23,98	23,98	0,00	3,30	3,30	3,30	
Refroidissement	Refroidissement au gaz	17,37	17,37	17,37	17,37	0,84	0,86	0,88	0,90	
	Climatisation - électrique	9,23	9,23	9,23	9,23	3,00	3,19	3,40	3,62	
Autres	Biomasse	11,23	11,23	11,23	11,23	0,30	0,31	0,31	0,30	
	Charbon	7,49	7,49	7,49	7,49	0,40	0,40	0,40	0,41	
	Électricité	9,20	9,20	9,20	9,20	0,98	1,01	1,03	1,03	
	Gaz	10,83	10,83	10,83	10,83	0,60	0,64	0,64	0,63	
	Liquides raffinés	11,73	11,73	11,73	11,73	0,60	0,62	0,62	0,62	

Hypothèses de coût et d'efficacité des technologies pour le secteur des bâtiments résidentiels										
Services	Technologie	Coût de la technologie (2015\$/GJ)				Efficacité de la technologie				
		2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050	
Chauffage	Fornaise à bois	3,31	3,31	3,31	3,31	0,40	0,40	0,41	0,41	
	Fornaise au charbon	3,31	3,31	3,31	3,31	0,50	0,50	0,51	0,52	
	Fornaise à gaz	4,55	4,55	4,55	4,55	0,85	0,86	0,87	0,87	
	Fornaise à gaz mélangé avec H2	0,00	7,02	7,02	7,02	0,00	2,18	2,18	2,18	
	Fornaise électrique	4,55	4,55	4,55	4,55	0,94	0,96	0,97	0,98	
	Thermopompe électrique	7,10	7,10	7,10	7,10	2,67	2,74	2,77	2,77	
Refroidissement	Refroidissement au gaz	39,46	39,46	39,46	39,46	0,84	0,86	0,88	0,90	
	Climatisation - électrique	23,56	23,56	23,56	23,56	2,89	3,07	3,27	3,48	
Autres	Biomasse	12,11	11,23	11,23	11,23	0,30	0,33	0,31	0,31	
	Charbon	7,49	7,49	7,49	7,49	0,40	0,40	0,41	0,41	
	Électricité	9,03	9,03	9,03	9,03	0,98	1,02	1,05	1,08	
	Gaz	10,64	10,53	10,53	10,53	0,61	0,63	0,64	0,65	



Liquides raffinés

11,73

11,73

11,73

11,73

0,60

0,61

0,61

0,62

Environment Canada Integrated Assessment Model (EC-IAM)

Le modèle d'évaluation intégrée d'Environnement Canada (EC-IAM) est un modèle d'évaluation intégrée développé par ECCC. Il fournit un cadre d'évaluation intégré pour évaluer les implications à long terme des politiques climatiques mondiales et nationales, dans un contexte où les dommages climatiques sont pris en compte.

EC-IAM représente le monde à travers 15 régions géopolitiques. Le modèle fonctionne par intervalle temporel de 5 ans (avec 2020 comme dernière année historique) et est conçu pour projeter jusqu'à la fin du siècle (2100). EC-IAM est classé comme un modèle prospectif et a la capacité de projeter la trajectoire économique optimale sur l'horizon temporel du modèle. Le modèle combine une approche du "haut vers le bas" pour définir les activités macroéconomiques ainsi qu'une approche du "bas vers le haut" du système énergétique pour représenter les technologies et les produits énergétiques.

EC-IAM est construit selon quatre modules intégrés (macroéconomie, système énergétique, climat et dommages) qui interagissent pour déterminer les choix technologiques optimaux liés aux politiques en matière de GES et aux dommages climatiques. Le module de production économique décrit les activités macroéconomiques où chaque région est représentée comme étant un agent économique producteur et consommateur de biens. Les régions prennent les décisions optimales afin de maximiser l'utilité actualisée (bien-être) de manière intertemporelle, laquelle est calculée à partir de la consommation. Le module énergétique détermine pour sa part le portfolio technologique optimal pour répondre à l'offre et à la demande d'énergie. Les ressources non renouvelables (pétrole et gaz naturel) sont représentées par un module d'Hotelling. Le niveau d'extraction est calculé de manière endogène en tenant compte à la fois des quantités de réserves prouvées et non prouvées et aux coûts associés à l'ajout de ressources et à l'extraction. Ces ressources sont échangeables sur les marchés mondiaux. À chaque période, les prix d'équilibre sont trouvés sur les marchés internationaux afin d'équilibrer l'offre et la demande mondiales. Le niveau de production de bioénergie est déterminé à partir de courbes de coûts influencées par le niveau potentiel des ressources forestières et des terres cultivables disponibles.

EC-IAM inclut les secteurs de transformation de l'énergie, tels que la production d'électricité, le raffinage des produits pétroliers et des bionénergétiques et la production d'hydrogène, pour convertir les ressources primaires en produits énergétiques finaux. Ces produits énergétiques finaux sont utilisés pour combler les besoins énergétiques de quatre secteurs : le transport, les bâtiments résidentiel et commercial, et le secteur industriel. Le choix et le déploiement des technologies se font en fonction de plusieurs facteurs tels que les coûts (énergétique et non énergétique), l'efficacité énergétique, l'intensité des émissions, le stock de capital, les préférences des consommateurs, le taux d'amélioration par apprentissage, et plus encore. Finalement, le module du climat et de dommages créent la dynamique entre les émissions régionales, la concentration globale, la température et les dommages marchands (PIB) ou non marchands (perte de bien-être).

Base de données et calibration du modèle EC-IAM

EC-IAM projette son propre scénario de référence. Celui-ci est fortement influencé par la base de données 2017 de l'International Energy Outlook (IEO) pour toutes les autres régions que le



Canada. Pour le Canada, le scénario de référence est calibré au scénario de référence Ref21 d'E3MC développé à l'interne par ECCC.

Ces principales sources d'information fournissent les données macroéconomiques, d'offre d'énergie, de la transformation et la demande d'énergétique ainsi que les émissions de GES. Le modèle EC-IAM est conçu pour être facilement mis à jour en fonction des nouvelles données de l'IEO. Le modèle est également structuré de manière à suivre une désagrégation similaire à celle des données disponibles par l'IEO. Autant les données historiques que les projections provenant de l'IEO et de E3MC sont utilisées dans EC-IAM.

Pour compléter ces bases de données et introduire des spécifications régionales, plusieurs autres ensembles de données sont aussi utilisés. Celles-ci servent principalement à la définition des coûts, des coefficients d'émissions de GES et des informations climatiques. Ces informations sont mises à jour continuellement à partir des nouvelles sources d'information disponibles avec les développements technologiques. Toutes ces données et hypothèses sont introduites dans une structure complexe et intégrée propre à EC-IAM qui a pour objectif de représenter la réalité du système énergétique. Les sources utilisées pour calibrer EC-IAM sont présentées dans les tableaux ci-dessous.

Système d'EC-IAM	Régions	Indicateurs	Sources/Références
Socio-économique	Autres régions	Population	International energy outlook 2017 https://www.eia.gov/outlooks/archive/ieo17/ieo_tables.php
		PIB	
	Canada	Population	Scénario de référence 21 d'E3MC produit par ECCC
		PIB	
Offre et demande d'énergie	Autres régions	Offre et demande d'énergie	International energy outlook 2017 https://www.eia.gov/outlooks/archive/ieo17/ieo_tables.php
	Canada		Scénario de référence 21 d'E3MC produit par ECCC
Génération d'électricité	Autres régions	Capacité et génération d'électricité	https://www.eia.gov/outlooks/archive/ieo17/ieo_tables.php
	Canada		Scénario de référence 21 d'E3MC produit par ECCC
	Toutes les régions	Coût d'investissement, coût d'exploitation et de maintenance, efficacité, facteur de capacité et intensité des émissions de capture et	- Cost and Performance Characteristics of New Generating Technologies, Annual Energy Outlook 2021 https://www.eia.gov/analysis/studies/powerplants/capitalcost/pdf/capital_cost_AEO2020.pdf - Projected Costs of Generating Electricity 2020 Edition https://iea.blob.core.windows.net/assets/ae17da3d-e8a5-4163-a3ec-2e6fb0b5677d/Projected-Costs-of-Generating-Electricity-2020.pdf - Renewables 2019 global status report https://www.ren21.net/wp-



		séquestration du carbone	content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf Renewable Power Generation Costs in 2018 https://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018
Bioénergie	Toutes les régions	Coût de production, ressources potentielles et superficie des terres cultivables	- Biomass Production and Logistics https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/P09_Biomass%20prod&log_ML_Dec2013_GSOK.pdf - Global Bioenergy Supply and Demand Projections: A working paper for REmap 2030 https://www.irena.org/publications/2014/Sep/Global-Bioenergy-Supply-and-Demand-Projections-A-working-paper-for-REmap-2030 - Biofuels Issues and Trends https://www.eia.gov/biofuels/issuestrends/pdf/bit.pdf - Biofuels and agriculture – a technical overview https://www.fao.org/3/i0100e/i0100e02.pdf - Land use https://www.fao.org/faostat/en/#data/RL - OECD-FAO Agricultural Outlook 2019-2028 https://www.oecd.org/agriculture/oecd-fao-agricultural-outlook-2019/ - Bioenergy potentials from forestry in 2050 https://www.researchgate.net/publication/260171815_Bioenergy_potentials_from_forestry_in_2050
Hydrogène	Toutes les régions	Coût et efficacité non énergétique	- H2A: Hydrogen Analysis Production Models https://www.nrel.gov/hydrogen/h2a-production-models.html - IEA G20 Hydrogen report: Assumptions https://iea.blob.core.windows.net/assets/a02a0c80-77b2-462e-a9d5-1099e0e572ce/IEA-The-Future-of-Hydrogen-Assumptions-Annex.pdf
Capture du dioxyde de carbone dans l'air	Toutes les régions	Coût et intrants énergétiques	- Keith, D. W., Holmes, G., Angelo, D. S., & Heidel, K. (2018). A process for capturing CO2 from the atmosphere. Joule, 2(8), 1573-1594. https://www.cell.com/joule/pdf/S2542-4351(18)30225-3.pdf
Extraction de combustibles fossiles	Autres régions	Données historiques sur le niveau de production	Statistical Review of World Energy – all data, 1965-2021 https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html
	Canada		Scénario de référence 21 d'E3MC produit par ECCC
	Toutes les régions	Potentiel des ressources prouvées et non prouvées	- Energy Resources and Potentials https://previous.iiasa.ac.at/web/home/research/Flagship-Projects/Global-Energy-Assessment/GEA_Chapter7_resources_hires.pdf - Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries Outside the United States



			https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/pdf/overview.pdf
	Toutes les régions	Coûts de production	- Cost of producing a barrel of crude oil by country https://knoema.com/rqaebad/cost-of-producing-a-barrel-of-crude-oil-by-country - Barrel Breakdown http://graphics.wsj.com/oil-barrel-breakdown/
Bâtiment	Autres régions de	Données historiques et prévisions sur de la demande énergétique	International energy outlook 2017 https://www.eia.gov/outlooks/archive/ieo17/ieo_tables.php
	Canada		Scénario de référence 21 d'E3MC produit par ECCC
	Toutes les régions d	Coût non énergétique et efficacité	GCAM model https://github.com/JGCRI/gcam-core
Transport	Autres régions de	Données historiques et prévisions de la demande énergétique	International energy outlook 2017 https://www.eia.gov/outlooks/archive/ieo17/ieo_tables.php
	Canada		Scénario de référence 21 d'E3MC produit par ECCC
	Toutes les régions	Coût non énergétique, efficacité et ratio par mode de transport	GCAM model https://github.com/JGCRI/gcam-core
Industrie	Autres régions	Données historiques et prévisions de la demande énergétique	International energy outlook 2017 https://www.eia.gov/outlooks/archive/ieo17/ieo_tables.php
	Canada		Scénario de référence 21 d'E3MC produit par ECCC
	Toutes les régions	Coût non énergétique, efficacité et	GCAM model https://github.com/JGCRI/gcam-core



		intensité des émissions de CSC	Technology readiness and costs of CCS https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/03/CCE-CCS-Technology-Readiness-and-Costs-22-1.pdf
Émissions	Autres régions	Niveau d'émissions de CO ₂	International energy outlook 2017 https://www.eia.gov/outlooks/archive/ieo17/ieo-tables.php
	Canada		Scénario de référence 21 d'E3MC produit par ECCC
	Toutes les régions	Émissions historiques de l'ATCATF	GHG data from UNFCCC https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/greenhouse-gas-data/ghg-data-unfccc/ghg-data-from-unfccc
Émissions Non- CO ₂	Toutes les régions	Niveau des émissions non-CO ₂ et coût marginal de réduction (CMR)	- Global Non- CO₂ Greenhouse Gas Emission Projections & Mitigation Potential: 2015-2050 https://www.epa.gov/global-mitigation-non-co2-greenhouse-gases/global-non-co2-greenhouse-gas-emission-projections - Methane Tracker Data Explorer Methane Tracker Data Explorer – Analysis - IEA

Tableau 3 : Indicateurs socio-économiques pour le Canada utilisés dans EC-IAM

Indicateurs	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
PIB (TCM) en milliards de USD 2018	2.39	2.61	2.85	3.12	3.4	3.7	3.85
Population en millions d'habitants	37.3	39.1	40.8	42.4	43.9	45.3	46.7

Tableau 4 : Coûts internationaux du pétrole et du gaz dans le scénario de référence de l'EC-IAM

Indicateurs	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Coût international du pétrole brut (2018 US\$)	6.25	6.72	7.1	7.82	8.4	8.9
Coût international du gaz naturel (2018 US\$)	4.84	5.01	5.13	5.47	5.58	5.78

Environment and Climate Change Canada's Multi-sector Multi-regional Model (EC-MSMR)

Le modèle multisectoriel et multirégional d'ECCC (EC-MSMR) est un modèle mondial d'équilibre général calculable (EGC) récursif-dynamique et à économie ouverte. Il comprend 23 secteurs de production et 3 secteurs de demande finale (consommation, dépenses publiques et investissement). Il capture la dynamique du commerce international entre les 17 régions modélisées (Australie, Nouvelle-Zélande, Chine, Japon, Corée, Inde, Canada, États-Unis, Mexique, Brésil, Royaume-Uni, Russie, Afrique du Sud, UE-27, pays de l'OPEP, Amérique du Sud sans le Brésil et le Venezuela, reste du monde). Chaque région du modèle est représentée par un seul ménage dont l'objectif est de maximiser le bien-être sujet à sa contrainte budgétaire.



Étant donné la nature récursive-dynamique du modèle, le ménage représentatif décide d'investir et de consommer à chaque période pour maximiser son bien-être en se basant uniquement sur les états passés de l'économie.

La formule récursive-dynamique du modèle

EC-MSMR fait la distinction entre le capital existant et le nouveau capital. Le capital existant est défini comme le capital restant après amortissement et est spécifique au secteur ; le capital nouveau est déterminé exclusivement à partir de nouveaux investissements. L'anticipation est myope, c'est-à-dire que les décisions d'investissement, de consommation et de production ne sont déterminées que par la situation économique de la période en cours. Le nouveau capital et la main d'œuvre sont mobiles entre les secteurs, mais immobiles entre les régions. L'épargne-investissement est modélisée par la réponse du Q de Tobin au rapport entre le rendement du capital et le coût de l'investissement. Dans le modèle EC-MSMR, l'élasticité d'investissement par rapport à ce ratio est supposée être de 0.3, ce qui signifie que lorsque le rendement du capital double par rapport au coût de l'investissement, l'investissement augmente de 30 % par rapport au scénario de référence. Il est également assumé que les dépenses publiques et le solde du compte courant sont fixes à des fins de comparaison des politiques.

Conditions d'équilibre

Toutes les émissions de GES, y compris les émissions de CO₂ et les émissions autres que CO₂ (par exemple, CH₄, N₂O et les gaz à effet de serre fluorés (comprenant les HFC, les PFC et le SF₆)), à l'exception de celles provenant de l'utilisation des terres, du changement d'affectation des terres et de la foresterie (ATCATF), sont prises en compte dans le modèle. De même, les émissions peuvent être réduites en remplaçant les produits à forte intensité d'émissions par des produits à faible intensité d'émissions dans la consommation finale. La calibration du scénario de référence dans EC-MSMR est effectué de manière récursive sur la base d'hypothèses de croissances économiques et des changements technologiques de la production (améliorations automatiques de l'efficacité énergétique (AEEI)). La procédure détaillée utilisée pour la calibration du scénario de référence est décrite dans le rapport co-écrit par FæHn et al. (2019).¹⁹

L'équilibre du modèle est caractérisé par la condition d'équilibre de marché de biens, de facteurs de production et de tous les autres marchés dans toutes les régions du modèle. Les prix des biens et des facteurs de production sont déterminés de manière endogène, ce qui garantit que tous les facteurs primaires sont pleinement utilisés et que tous les marchés sont en équilibre.

Le prix du pétrole est donné de manière exogène et les ressources s'ajustent de manière endogène en conséquence de celui-ci. Le modèle suppose que les prix du gaz augmentent avec ceux du pétrole et, par conséquent, n'impose pas de cibles de prix du gaz dans le calcul de l'équilibre final. Le modèle calcule un scénario de référence avec un prix de référence du pétrole brut provenant du 2021 Annual Energy Outlook (AEO) de US Energy Information Administration's (EIA) (tableau 1). Étant donné que les prix sont déterminés de manière endogène dans le modèle, ce qui permet aux marchés d'être à l'équilibre, les prix de référence sont considérés comme des valeurs initiales et les prix observés s'écartent des prix référence comme l'exige le modèle afin de parvenir à une solution d'équilibre.

¹⁹ FæHn et al., 2019



Tableau 5: Prix de référence des matières premières énergétiques EC-MSMR

Commodity (2014 USD)	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Brent Spot Price (dollars per barrel)	61.69	75.43	84.18	91.08	97	103.23	108.95
Natural Gas at Henry Hub (dollars per mmBtu)	2.57	3.12	3.65	3.68	3.69	3.71	3.83
Coal, Minemouth (dollars per ton)	34.79	37.63	37.24	37.5	39.27	39.59	39.24
Electricity (Cents per kilowatthour)	10.77	11.33	11.51	11.22	10.86	10.59	10.28

**World oil price data is based on brent prices as reported by AEO 2021 for the years 2019-2050. Conversion from nominal dollars to 2014 USD was done using the AEO Energy Commodities and Services price index*

Les restrictions des émissions de GES dans la production et la consommation sont intégrées soit par le biais de contraintes d'émission exogènes pour maintenir les émissions à une limite spécifiée qui déterminent de manière endogène les taxes sur les émissions requises ou par le biais de taxes exogènes sur les GES qui déterminent les réductions réalisées de manière endogène. Les revenus de la réglementation des émissions proviennent des taxes sur le CO₂ (ou, de manière équivalente, de la mise aux enchères des quotas d'émission) et sont recyclés dans l'économie comme des revenus neutres dans la région concernée.

Données d'entrée et paramétrisation du modèle

Les principales sources de données utilisées dans le modèle sont le GTAP (Global Trade Analysis Project) de la version GTAP 10²⁰ et l'International Energy Outlook 2019²¹ de l'US Energy Information Administration's (EIA). GTAP 10 présente les principales caractéristiques suivantes : (1) année de base 2014 ; (2) tableaux d'intrants-extrants multirégionaux mondiaux fournissant les valeurs clés pour les transactions économiques, notamment la production, la consommation et le commerce bilatéral pour 65 secteurs et 141 régions ; (3) marges fiscales initiales pour les intrants, la production et le commerce ; (4) émissions de CO₂ liées aux combustibles fossiles par secteur et par combustible ; (5) valeurs des paramètres, tels que l'élasticité de substitution dans la valeur ajoutée et le commerce. Dans un tableau satellite, GTAP fournit également des données détaillées sur les émissions de GES autres que le CO₂, comme le CH₄, le N₂O et le gaz F, pour l'année de base.

Pour le Canada, les comptes économiques de l'année de base provenant des tableaux nationaux d'intrants-extrants de niveau D de 2014 de Statistique Canada sont agrégés au profil sectoriel du modèle. Les données sur l'énergie et les émissions du Canada, y compris les émissions de CO₂ et autre que CO₂, proviennent du scénario de référence E3MC 2021.

Tableau 6 : PIB réel de MSMR selon le scénario de référence du modèle

Indicateur	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
PIB réel (milliards de dollars de 2014)	1711,3	1995,4	2181,8	2391,7	2622,6	2860,8	3098,3

Pour les autres régions de l'annexe 1, les hypothèses de technologie et de croissance économique proviennent des "Fourth Biennial Reports" (BR4)²² soumis par la CCNUCC; 10 pour toutes les autres régions, les hypothèses pour la calibration proviennent de l'International Energy Outlook 2019 de l'EIA sur l'économie, l'énergie et les émissions de CO₂²³. Pour les non-CO₂, la

²⁰ Aguiar et al., 2016

²¹ US EIA, 2019

²² UNFCCC, 2020

²³ EIA-IEO, 2019



projection des émissions et les estimations des CMR spécifiques aux pays pour différentes activités proviennent du US Environmental Protection Agency. Nous utilisons la valeur des paramètres d'élasticité liés aux substitutions de capital, de travail, d'énergie et de matériaux à partir des estimations empiriques de Okagawa et Ban (2008), car la désagrégation sectorielle et régionale est similaire à celle de notre modèle.²⁴ Plus important encore, ces estimations ont été obtenues pour une utilisation en EGC. La fourchette d'élasticité pour KLE se situe entre 0,2 et 0,3.²⁵

Table 7: Base de données et information d'EC-MSMR

Système d'EC-MSMR	Régions	Indicateurs	Sources/ Références
Socio-économique	Canada	PIB	Scénario de référence 21 d'E3MC produit par Environnement et Changement Climatique Canada
	É-U		US Energy Information Administration's (EIA) Annual Energy Outlook 2021 (US EIA, 2021). U.S. Energy Information Administration - EIA - Independent Statistics and Analysis.
	Autres régions		US Energy Information Administration's (EIA) International Energy Outlook 2019 (US EIA, 2019). https://www.eia.gov/outlooks/leo/.
Énergie	Canada	Balance de l'offre et de la demande d'énergie	Scénario de référence 21 d'E3MC produit par Environnement et Changement Climatique Canada
	É-U		US Energy Information Administration's (EIA) Annual Energy Outlook 2021 (US EIA, 2021). U.S. Energy Information Administration - EIA - Independent Statistics and Analysis.
	Autres régions		US Energy Information Administration's (EIA) International Energy Outlook 2019 (US EIA, 2019). https://www.eia.gov/outlooks/leo/.
Nourriture, alimentation animale et forêt	Canada	Base de données historiques sur les produits agricoles et d'élevage et les produits forestiers	Statistics Canada 2014 supply and use tables D-level. Supply and Use Tables (statcan.gc.ca)
	Autres régions		Aguiar, A., Chepeliev, M., Corong, E., McDougall, R., & van der Mensbrugghe, D. (2019). The GTAP Data Base: Version 10. <i>Journal of Global Economic Analysis</i>, 4(1), 1-27. from https://www.jgea.org/ojs/index.php/jgea/article/view/77
Génération d'électricité	Toutes les régions	Parts de la main d'œuvre, du capital et	Aguiar, A., Chepeliev, M., Corong, E., McDougall, R., & van der Mensbrugghe, D. (2019). The GTAP Data Base: Version 10. <i>Journal of Global Economic Analysis</i>, 4(1), 1-27.

²⁴ Okagawa et Ban, 2008

²⁵ Nous avons également procédé à une comparaison croisée de ces valeurs avec d'autres modèles et avons constaté qu'elles ne sont pas significativement différentes des autres.



		des ressources et le coût actualisé de production	from https://www.jgea.org/ojs/index.php/jgea/article/view/77
Services commerciaux et publics	Canada	Données d'intrants et extrants dans le secteur des services	Statistics Canada 2014 supply and use tables D-level Supply and Use Tables (statcan.gc.ca)
	Autres régions		Aguiar, A., Chepeliev, M., Corong, E., McDougall, R., & van der Mensbrugghe, D. (2019). The GTAP Data Base: Version 10. <i>Journal of Global Economic Analysis</i>, 4(1), 1-27. from https://www.jgea.org/ojs/index.php/jgea/article/view/77
Industrie	Canada	Données d'intrants et extrants du secteur industriel	Statistics Canada 2014 supply and use tables D-level. Supply and Use Tables (statcan.gc.ca)
	Autres régions		Aguiar, A., Chepeliev, M., Corong, E., McDougall, R., & van der Mensbrugghe, D. (2019). The GTAP Data Base: Version 10. <i>Journal of Global Economic Analysis</i>, 4(1), 1-27. from https://www.jgea.org/ojs/index.php/jgea/article/view/77
Transport	Canada	Données d'intrants et extrants du secteur des transport	Statistics Canada 2014 supply and use tables D-level Supply and Use Tables (statcan.gc.ca)
	Autres régions		Aguiar, A., Chepeliev, M., Corong, E., McDougall, R., & van der Mensbrugghe, D. (2019). The GTAP Data Base: Version 10. <i>Journal of Global Economic Analysis</i>, 4(1), 1-27. from https://www.jgea.org/ojs/index.php/jgea/article/view/77
Émissions non-CO ₂	Canada	Cibles d'émissions des CO ₂ et non-CO ₂ pour l'énergie et données sur les émissions	Scénario de référence 21 d'E3MC produit par Environnement et Changement Climatique Canada
	Autres régions		- Aguiar, A., Chepeliev, M., Corong, E., McDougall, R., & van der Mensbrugghe, D. (2019). The GTAP Data Base: Version 10. <i>Journal of Global Economic Analysis</i>, 4(1), 1-27. from https://www.jgea.org/ojs/index.php/jgea/article/view/77 - EPA (2019). Non-CO₂ Greenhouse Gas Data Tool. Non-CO2 Greenhouse Gas Data Tool US EPA. - UNFCCC (2020). Fourth Biennial Reports (BR4). Fourth Biennial Reports - Annex I UNFCCC.

Technologies de production d'électricité présentes dans EC-MSMR

Le modèle EC-MSMR représente diverses technologies de production d'électricité qui sont actives ou le deviennent lorsqu'elles sont rentables. Le secteur de l'électricité est divisé en production, transport et distribution d'électricité. Le secteur de la production d'électricité est décomposé en diverses technologies de production : (1) combustibles fossiles (charbon, pétrole,



gaz), (2) nucléaire, (3) hydroélectricité, (4) éolien, (5) solaire, (6) géothermique, (7) biomasse, (8) charbon avec capture du carbone, (9) gaz naturel avec capture du carbone, (10) biomasse avec capture du carbone, et (11) solaire avec stockage. Les quatre dernières technologies de production d'électricité sont des technologies alternatives de production d'électricité qui peuvent être activées en présence d'une politique climatique. Les technologies à émissions négatives peuvent jouer un rôle important dans la transformation du secteur de l'électricité pour réduire les GES.

Chaque technologie de production d'électricité est représentée par des fonctions de coût CES (Constant Elasticity of Substitution) imbriquées les unes aux autres sur plusieurs niveaux. L'offre globale d'électricité provient de l'agrégation des CES de tous les types de production, ce qui implique un arbitrage entre les types de production. Ces fonctions de coût décrivent comment le capital, le travail, l'énergie et les ressources matérielles réagissent aux changements de prix. La désagrégation du secteur de l'approvisionnement en électricité est effectuée conformément à l'International Energy Outlook, Energy2020. Les informations sur les ratios d'intrants (capital, travail et ressources) et le coût actualisé des technologies de production d'électricité proviennent respectivement du modèle Phoenix²⁶ et de l'Annual Energy Outlook (AEO) de l'EIA (Tableau 8).

Tableau 8: Hypothèses de LCOE moyen des technologies de production d'électricité (2014 USD/MWh)

Technologie	2019	2040
Charbon conventionnel	99,3	90,4
Charbon gazéification intégrée avec CSC (CCGI)	120,4	103,5
CCGI avec CSC	153,1	125,9
Cycle combiné conventionnel (CC)	68,9	84,3
Cycle combiné avancé	66,9	80,8
CC avec CSC avancé	94,8	107,0
Nucléaire avancé	89,4	86,2
Géothermie	46,2	65,9
Biomasse	106,6	100,7
Biomasse avec CSC	164,3	140,3
Éolien	83,4	75,9
Éolien en mer	212,0	176,9
Solaire PV	123,2	105,2
Solaire thermique	232,2	196,0
Hydroélectricité	87,8	87,9

Hypothèses et sources des technologies alternatives

1. Biomasse avec captage et stockage du carbone (BECSC)

Le BECSC est une technologie alternative dans le modèle EC-MSMR qui produit à la fois de l'électricité et crée des émissions négatives de CO₂ afin de réduire les émissions dans les scénarios de décarbonisation profonde. Le bloc de production d'électricité avec BECSC utilise le capital, la main-d'œuvre et les ressources agricoles comme matière première tout en permettant la substitution entre les intrants sur la même base

²⁶ Wing et al., 2011



d'imbrication que celle décrite dans la figure 2. La technologie produit également des émissions de carbone négatives comme sous-produit. Les intrants pour le BECSC sont déterminés par la même spécification que les technologies de production d'électricité à partir de la biomasse, mais les intrants de capital et de main-d'œuvre sont augmentés pour tenir compte des besoins supplémentaires liés la séquestration du carbone. Pour ce faire, un facteur d'échelle est calculé à l'aide du coût actualisé de l'électricité (LCOE) du BECSC tiré de la documentation du modèle Phoenix.²⁷ Cela produit une valeur qui est cohérente avec l'estimation récente de 100 \$ par tonne de CO₂ séquestrée.²⁸ La quantité de CO₂ séquestrée par unité de production diffère par région en fonction des émissions de CO₂ des biens agricoles utilisés comme matière première avec une efficacité de capture de 90 %. Cette spécification du BECSC ne tient toutefois pas compte des problèmes environnementaux ou de sécurité alimentaire qui pourraient survenir en raison de l'augmentation de la production de matières premières.

2. Capture directe du dioxyde de carbone (DAC)

La technologie alternative de DAC est présente dans EC-MSMR. L'introduction de ce type technologie implique de définir la structure de coûts des divers intrants nécessaires à la technologie. Dans EC-MSMR, le bloc de production du DAC utilise une quantité fixe d'intrants, par tonne de CO₂ capturée, à travers le temps et les régions. Les prix varient selon la composition des intrants par produit, région et temps. Les coûts et les paramètres sont calibrés à partir d'une étude de Keith et al., (2018).²⁹ Les unités d'énergie physique sont converties à l'aide des prix du scénario de référence 2021 du modèle E3MC d'ECCC pour le gaz naturel et l'électricité au niveau national au Canada. Comme le DAC est une technologie qui ne fait l'objet d'aucun projet commercial à l'heure actuelle, les coûts projetés et les intrants requis comportent un large éventail d'estimations. Le rapport spécial sur 1,5 ° C a estimé un coût du DAC à 200 USD par tonne capturée comme valeur médiane.³⁰ Le modèle EC-MSMR suppose une fourchette de coûts de 300 à 600 USD nominaux par tonne de CO₂ capturée en prenant en compte le coût des intrants de capital, de main d'œuvre et de carburant. Le prix réel que les régions paient par tonne de CO₂ captée varie en fonction des prix régionaux de l'électricité, du capital, de la main-d'œuvre et du gaz naturel.

3. Carburants alternatifs

Les carburant alternatifs fonctionnent dans le modèle comme étant parfaitement substituables aux combustibles fossiles.

- Biocarburant -> pétrole raffiné
- Gaz naturel renouvelable -> gaz naturel
- Hydrogène -> Charbon, gaz naturel, pétrole raffiné

Les intrants des carburant alternatifs sont paramétrés en utilisant la même structure d'intrants que les combustibles conventionnels, mais en appliquant un facteur d'échelle pour tenir compte de l'augmentation des coûts de production. Le facteur d'échelle est déterminé en utilisant le prix exogène du carburant alternatifs par rapport au combustible en place pour mettre les coûts à l'échelle. Les estimations de prix relatifs

²⁷ Ibid.

²⁸ National Academies of Sciences, 2019

²⁹ Keith et al., 2018

³⁰ Rogelj et al., 2018b



utilisées sont tirées du modèle EC-Pro D Level d'ECCC, dans lequel la production d'hydrogène à partir l'électrolyse provenant d'hydroélectricité est fixée à 22 CAD\$/GJ et le gaz naturel à 3,8 CAD\$/GJ. Dans le modèle, les carburants alternatifs entrent sur le marché dès que le prix les incite à le faire. Par exemple, lorsque le prix sur le carbone est suffisamment élevé et rend les carburants alternatifs compétitifs par rapport au combustible fossiles, ceux-ci les remplacent.

Technologies transformatrices dans les secteurs de l'industrie lourde

Outre les technologies conventionnelles standard qui sont opérationnelles dans le scénario de référence, le modèle présente des technologies transformatrices dans quatre secteurs, exploitation de produits miniers non métalliques (incluant le ciment), le fer et l'acier, les produits chimiques et la pâte à papier, le papier et l'imprimerie. La fonction de production suit une structure d'imbrication similaire, mais la composition des intrants, incluant les parts des facteurs, est significativement différente pour ces technologies et, surtout, les nouvelles technologies n'utilisent pas ou très peu de combustibles fossiles.³¹ En tant que technologies émergentes et évolutives, elles présentent un potentiel important de réduction des coûts grâce à l'apprentissage par la pratique.³¹ Des courbes d'apprentissage sont introduites pour tenir compte des changements techniques possibles résultant d'activités innovantes. Le concept d'effet d'apprentissage comme source distincte de changement technique a été présenté par Wright (1936) et Arrow (1962). Le changement technique par effet d'apprentissage est généralement dérivé des courbes d'apprentissage où le progrès est mesuré en termes de réduction du coût unitaire (ou du prix) d'un produit en fonction de l'expérience acquise par l'augmentation cumulative de la capacité ou de la production. Par conséquent, il n'existe pas de taux d'apprentissage absolu ou unique pour une technologie donnée. En outre, en raison des différences sous-jacentes, les estimations des taux d'apprentissage pour différentes technologies peuvent se prêter à différents modèles et spécifications. Ceci est prévisible car les caractéristiques des différentes technologies peuvent varier d'une industrie à l'autre. Cela inclut notamment le changement technique induit par l'accumulation d'expérience avec une technologie donnée,³² lequel peut être exprimée comme suit :

$$(1) PR_t = \lambda^{\ln(1+Experience_{t-1})}$$

$$s. t. \lambda \leq 1, E. g. \lambda = 0.98$$

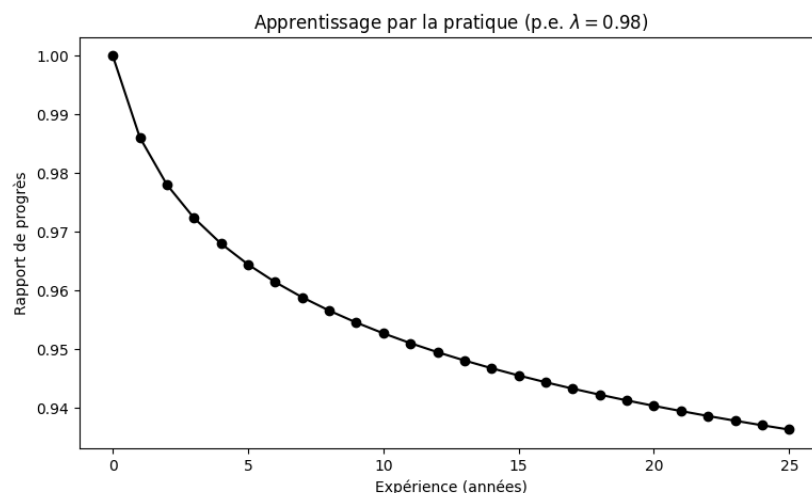
$$LR_t = 1 - PR_t$$

Le ratio de progrès (PR) représente le rapport entre le coût final et le coût initial associé à l'expérience acquise grâce à l'augmentation de la production cumulative. Dans l'équation 1, λ est une constante (par exemple, 0,98) qui peut être ajustée manuellement pour faire varier la pente de la courbe d'apprentissage. Une valeur lambda plus petite permettrait des réductions de coûts plus importantes sur la même période. L'exposant logarithmique caractérise la forme de la courbe d'apprentissage où les années d'expérience passée avec une technologie donnée sont utilisées comme une approximation de la production cumulative. Dès qu'une technologie dans un secteur donné devient rentable et commence à produire, le secteur commence à bénéficier de réductions de coûts endogènes basées sur les années d'expérience passées avec les technologies avancées à faible émission de carbone. Le taux d'apprentissage (LR) représente les économies de coûts proportionnelles réalisées par une augmentation de la production cumulative ou de l'expérience.

³¹ Jamasb 2007, Hogan 2014, EPA 2016

³² Wright 1936, Arrow 1962, Romer 1990

Figure 4 : Apprentissage par la pratique



La différence de prix, incluant les parts de coût des intrants pour les technologies transformatrices dans les quatre secteurs, est recueillie à partir d'un examen complet de la littérature et par l'utilisation des tableaux d'intrants-extrants de GTAP pour les informations manquantes. Par exemple, le coût non énergétique disponible est réparti de manière détaillée en parts d'intrants en utilisant le tableau des intrants-extrants. Les nouvelles structures d'intrants ont été mises à l'échelle de sorte que la différence de coût entre les technologies conventionnelles et avancées soit exactement égale au prix du carbone au seuil de rentabilité. Les prix du carbone au seuil de rentabilité pour ces technologies ont été estimés en utilisant la composition énergétique des technologies conventionnelles par rapport aux nouvelles technologies et le prix du carbone requis pour égaliser les coûts. Le scénario de référence reflète également les améliorations de l'efficacité énergétique dans les technologies conventionnelles. Cependant, l'information sur la façon dont le coût de production des technologies avancées évolue au fil du temps n'est pas disponible. Ici, nous avons introduit la courbe d'apprentissage pour tenir compte de l'amélioration de l'efficacité de la technologie conventionnelle. Cela permet de s'assurer qu'une fois que les technologies avancées sont activées, elles restent actives les années suivantes (tableau 9).

Tableau 9 : Seuil de rentabilité et première année de disponibilité de la technologie*

Secteur	Seuil de rentabilité (2016 \$/tonne of CO ₂ e)	Année
Produits chimiques	152	2030
Fer et acier	210	2038
Minéraux non métalliques (ciment)	138	2029
Pâte à papier, papier et impression	130	2028



* Note: Les calculs sont basés sur les estimations de la littérature³³ et les tableaux d'offre et d'utilisation canadiens de 2016.

B. Aperçu de la modélisation du secteur pétrolier et gazier

L'atteinte des ambitions climatiques spécifiques à chaque pays suppose une réduction significative de l'offre et de la demande de combustibles fossiles puisque ces sources d'énergie (c'est-à-dire, charbon, pétrole et gaz naturel) sont des contributeurs majeurs aux émissions de GES mondiales. Cependant, la modélisation prévoit que la consommation de combustibles fossiles pourrait rester importante pour plusieurs régions du monde.

Pour la production de pétrole, la part de marché de la production pétrolière canadienne dans les modèles dépend de l'approvisionnement en combustibles fossiles et de l'accès au marché international pétrolier. Le tableau 10 montre que l'offre de pétrole canadien sur le marché mondial (c'est à dire au-delà de l'Amérique du Nord) varie. La production de pétrole brut du Canada pourrait diminuer en raison des changements technologiques et des ambitions climatiques accrues des États-Unis, qui absorbent actuellement une part considérable du marché canadien du pétrole brut et du gaz naturel. Cependant, la production de pétrole du Canada pourrait également demeurer soutenue si le marché international devient plus accessible pour certains pays à l'extérieur de l'Amérique du Nord (p. ex. ceux dont les objectifs d'émissions pour 2030 et 2050 sont moins ambitieux), en raison de la demande subsistante de pétrole brut dans ces pays.

Dans GCAM, où les hypothèses contraignent les exportations de pétrole canadien au marché américain, le modèle estime que la part canadienne du marché mondial de l'approvisionnement en pétrole brut pourrait chuter jusqu'à 2,8 % en 2050. Cela représente une réduction de 52 % par rapport à 2020. D'autre part, dans EC-IAM, où les hypothèses permettent au pétrole d'être exporté plus facilement sur le marché mondial, le pétrole canadien pourrait augmenter sa part du marché mondiale jusqu'à 9,6 % en 2050, soit une augmentation de 66 % par rapport aux niveaux de 2020.

Dans le cas du gaz naturel, tous les modèles estiment que la part canadienne d'approvisionnement pourrait diminuer. Cette diminution est principalement due aux restrictions de transport de gaz naturel autre que par le réseau de gazoducs dans les modèles, ce qui limite l'exportation de gaz naturel canadien au-delà de l'Amérique du Nord. Les modèles prévoient que la part canadienne de l'approvisionnement mondial en gaz naturel pourrait passer de 5,2 % en 2020 à une fourchette de 2,4 % à 3,8% en 2050 selon le scénario et le modèle considérés.

La modélisation projette que la demande canadienne de combustibles fossiles diminue dans tous les scénarios. Toutefois, les modèles prévoient que la rigidité dans la substitution des intrants énergétiques dans certains secteurs rend difficile de réduire complètement la demande de combustibles fossiles, en particulier pour les utilisations non-énergétiques. En outre, la modélisation montre que la substitution des combustibles fossiles n'est pas économiquement ou techniquement réalisable pour certains secteurs (sur la base de la compréhension actuelle de la technologie et des ressources) et ces conditions limitent la possibilité de réduire davantage la demande de pétrole et de gaz naturel.

³³ La documentation suivante décrit les diverses technologies à faible émission de carbone et fournit des hypothèses de coût lorsqu'elles sont disponibles ; Bataille et al. (2018), Fleiter et al. (2019), Kranenberg et al. (2016), Rissman et al (2020), Roussanaly et al. (2017), Sluisveld et al. (2021)



Tableau 10 : Production et consommation du pétrole et gaz naturel en 2020 et 2050 – Tous les scénarios

	Pétrole		Gaz naturel	
	Exajoules		Exajoules	
	2020	2050	2020	2050
Production				
Canada	11,1	4,7 à 11,8	7,5	3,8 à 6,3
É-U	19,2	14,4 à 14,9	21,2	19,9 à 27,8
Europe	13,2	2,1 à 4,8	12,8	5,5 à 11,7
OPEC+	94,0	80,0 à 103,2	65,3	79,3 à 84,2
Reste du monde	53,8	14,1 à 40,3	36,8	43,2 à 43,8
Total mondial	191,3	122,3 à 167,7	143,7	162,0 à 163,9
Demande				
Canada	4,2	0,9 à 1,6	4,3	1,4 à 2,5
É-U	36,2	14,4 à 16,2	30,6	21,4 à 24,5
Europe	26,7	5,5 à 12,6	16,5	5,8 à 9,7
OPEC+	36,1	35,8 à 42,7	42,4	44,1 à 50,7
Reste du monde	88,2	63,5 à 95,2	50,0	81,8 à 83,9
Total mondial	191,4	122,3 à 167,7	143,7	162,0 à 163,9



Références de GCAM

- Arbuckle, E., [Binsted, M.](#), [Davies, E.](#), Chiappori, D., Bergero, M., [Siddiqui, M.](#), Roney, C., McJeon, H., Zhou, Y., [Macaluso, N.](#), (2012). Insights for Canadian electricity generation planning from an integrated assessment model: Should we be more cautious about hydropower cost overruns? 2021. Energy Policy 150 (112138) page 1-13.
- Bergero, M., [Binsted, M.](#), Younis, O., [Davies, E.](#), [Siddiqui, M.](#), Xing, R., Arbuckle, E., Chiappori, D., Fuhrman, J., McJeon, H., [Macaluso, N.](#), (2022). Technology, technology, technology: An integrated assessment of deep decarbonization pathways for the Canadian oil sands. Energy Strategy Review 2022. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100804>
- Carvajal, P.E., Li, F.G.N., (2019). Challenges for hydropower-based nationally determined contributions: a case study for Ecuador. Clim. Pol. 19 (8), 974–987. <https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1617667>.
- Clarke, J., Edmonds, J., 1993. Modelling energy technologies in a competitive market. Energy Econ. 15 (2), 123–129. [https://doi.org/10.1016/0140-9883\(93\)90031-L](https://doi.org/10.1016/0140-9883(93)90031-L).
- ECCC. Greenhouse gas emissions projection: Canadian Environmental sustainability indicator, May 2022, [Greenhouse gas emissions projections \(canada.ca\)](#)
- Edmonds, J., Reilly, J., (1985). Global Energy: Assessing the Future. Oxford University Press, Oxford, U.K.
- Hartin, C.A., Patel, P., Schwarber, A., Link, R.P., Bond-Lamberty, B.P., 2015. A simple object-oriented and open-source model for scientific and policy analyses of the global climate system – Hector v1.0. Geosci. Model Dev. (GMD) 8 (4), 939–955. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-939-2015>.
- McFadden, D., 1980. Econometric models for probabilistic choice among products. J. Bus. 53 (3), S13–S29.
- Train, K., 1993. Qualitative Choice Analysis: Theory, Econometrics, and an Application to Automobile Demand. MIT Press, Cambridge, MA.

Références de EC-MSMR

- Aguiar, A., Chepeliev, M., Corong, E., McDougall, R., & van der Mensbrugghe, D. (2019). The GTAP Data Base: Version 10. *Journal of Global Economic Analysis*, 4(1), 1-27. Retrieved from <https://www.jgea.org/ojs/index.php/jgea/article/view/77>
- Arrow K (1962). The Economic Implications of Learning by Doing. *The Review of Economic Studies*, 29(3), 155-173. Available at [doi:10.2307/2295952](https://doi.org/10.2307/2295952).
- Bataille, C. (2018). A Review of EC-PRO's capacity to simulate very deep reductions in heavy industry emissions over the 2030-2050 period, with a detailed case study of how to incorporate transformational mitigation in the Québec iron and Steel Industry.
- EIA-AEO (2021). ANNUAL ENERGY OUTLOOK 2021. Available at [U.S. Energy Information Administration - EIA - Independent Statistics and Analysis](#).
- EIA-IEO (2019). International Energy Outlook 2019. Available at <https://www.eia.gov/outlooks/leo/>.
- EPA (2010). EPA Analysis of the American Power Act in the 111th Congress. Available at <http://www.epa.gov/climatechange/economics/economicanalyses.html#apa2010>.
- EPA (2019). Non-CO2 Greenhouse Gas Data Tool. Available at [Non-CO2 Greenhouse Gas Data Tool | US EPA](#).
- FæHn, T., Bachner, G., Fujimori, S., Ghosh, M., Hamdi-Cherif, M., Lanzi, E., Paltsev, S., Vandyck, T., Beach, R., Cunha, B., 2019. Capturing key energy and emission trends in CGE models: Assessment of status and remaining challenges. Presented at the 22nd Annual Conference on Global Economic Analysis, Warsaw, Poland. [GTAP Resources: Resource Display: Capturing key energy and emission trends in CGE mo... \(purdue.edu\)](#)



- Fleiter, T., Herbst, A., Rehfeldt, M., & Arens, M. (2019). Industrial Innovation | Part 2: Scenario analysis and pathways to deep decarbonisation. ICF Consulting Services Limited and Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI). https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/strategies/2050/docs/industrial_innovation_part_2_en.pdf
- Hogan, W (2014). Clean Energy Technologies: Learning by Doing and Learning by Waiting. John F. Kennedy School of Government Harvard University. Energy Policy Seminar. Available at https://projects.ig.harvard.edu/files/energyconsortium/files/hogan_lbd_overview_092914_2.pdf.
- Hyman, RC., JM. Reilly, MH. Babiker, A. De Masin and HD. Jacoby (2003). Modeling Non-CO2 greenhouse gas abatement. Environmental Modeling and Assessment, 8(3), 175–186, MIT Joint Program Reprint 2003-9.
- Jamasb, T (2007). Technical Change Theory and Learning Curves: Patterns of Progress in Electricity Generation Technologies. The Energy Journal, 28(3), 51-72. Available at <http://www.jstor.org/stable/41323109>.
- Keith, D., G. Holmes, D. Angelo, & K. Heidel (2018). A Process for Capturing CO2 from the Atmosphere, Joule 2, 1573–1594. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>
- Kranenburg, K., Schols, E., Gelever, H., Kler, R. (2016). Empowering The Chemical Industry: Opportunities for Electrification. ENC Energy Research Centre of the Netherlands. [Empowering the chemical industry - Opportunities for electrification \(tno.nl\)](https://www.tno.nl/en/empowering-the-chemical-industry-opportunities-for-electrification)
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2019. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. The National Academies Press, Washington, DC. [Front Matter | Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda | The National Academies Press](https://www.nationalacademies.org/publications/2019/negative-emissions-technologies-and-reliable-sequestration-a-research-agenda)
- Okagawa and Ban (2008). Estimation of substitution elasticities for CGE models. Available at <http://www2.econ.osaka-u.ac.jp/library/global/dp/0816.pdf>.
- Rissman, J., Bataille, C., Masanet, E., Aden, N., Morrow III, W., Zhou, N., Elliott, N., Dell, R., Heeren, N., Huckestein, B., Cresko, J., Miller, S., Roy, J., Fennell, P., Cremmins, B., Blank, T., Hone, D., Williams, e., de la Rue du can, S., Sisson, B., Williams, M., Katzenberger, J., Burtraw, D., Sethi, G., Ping, H., Danielson, D., Lu, H., Lorber, T., Dinkel, J., & Helseth, J. (2020). Technologies and policies to decarbonize global industry: review and assessment of mitigation drivers through 2070. Applied Energy 266, 114848. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0306261920303603?token=4C5E01EC2DD7A8F15952D52564ECC7770C64E15270F2929125203AF87AFE4A9E97D885D7678B32B069E25FAEF6B46E01>
- Rogelj, J., D. Shindell, K. Jiang, S. Fifita, P. Forster, V. Ginzburg, C. Handa, H. Kheshgi, S. Kobayashi, E. Kriegler (2018). Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of 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 [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skeea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press. [Global Warming of 1.5 °C — \(ipcc.ch\)](https://www.ipcc.ch/report/sr15/)
- Romer, P. (1990). Endogenous Technological Change. Journal of Political Economy, 98(5 II), S71-S102. Available at <http://www.jstor.org/stable/2937632>.
- Roussanaly, S., Fu, C., Voldsund, M., Anantharaman, R., Spinelli, M., Romano, M. (2016). Techno-economic analysis of MEA CO2 capture from a cement kiln – impact of steam supply scenario. Elsevier. Energy Procedia 114 (2017) 6229 – 6239. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1761>



Sluisveld M., Boer H., Daioglou V., Hof A., Vuuren D. (2021) A race to zero - Assessing the position of heavy industry in a global net-zero CO2 emissions context, Journal of Energy and Climate Change, Volume 2, 100051, ISSN 2666-2787, <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2021.100051>.

Wing, I., K. Daenzer, K. Fisher-Vanden, and K. Calvin (2011). Phoenix Model Documentation. Available at [phx_documentation_august_2011.pdf \(umd.edu\)](http://phx_documentation_august_2011.pdf (umd.edu)).

Wright, T (1936). Factors Affecting the Cost of Airplanes. Journal of the Aeronautical Sciences, vol.3, 122-128. Available at <https://doi.org/10.2514/8.155>.

UNFCCC (2020). Fourth Biennial Reports (BR4). Available at [Fourth Biennial Reports - Annex I | UNFCCC](https://unfccc.int/4br/annex1).