

Résumé

Perspectives énergétiques canadiennes – 3^e édition

Les trajectoires vers un Canada carboneutre Horizon 2060

IEET INSTITUT
DE L'ÉNERGIE
TROTIER

ESMIA
Energy Super Modelers
and International Analysts

Pôle3c | Environnement, énergie
et économie circulaire
HEC MONTRÉAL

Analyse et rédaction

Institut de l'énergie Trottier

- Simon Langlois-Bertrand, PhD (auteur principal)
- Normand Mousseau, PhD

Modélisation

ESMIA Consultants

- Kathleen Vaillancourt, PhD
- Mathilde Bourque, MASc

Révision

- Louis Beaumier, MASc
- Laure-Anne Douchamps, PhD
- Olivier Bahn, PhD
- Hamed Kouchaki-Penchah, PhD

Traduction et révision linguistique

- Sabine Monnin

Conception visuelle

- Agence IMPAKT Scientifik Inc.

Graphisme et mise en page

- Norman Terrault
- Dominic Rivest (graphiques et programmation)

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la Fondation familiale Trottier pour le soutien financier ayant permis la réalisation de ce rapport, ainsi que son appui à diverses initiatives antérieures liées à l'énergie et aux changements climatiques, dont certaines ont directement inspiré le présent travail.

Note aux lecteurs

Ce rapport n'engage que la responsabilité des auteurs. Toutes les précautions raisonnables ont été prises pour vérifier la fiabilité du matériel dans cette publication. Ni les auteurs, ni aucune personne agissant en leur nom ne peuvent être tenus pour responsable de l'utilisation qui découlerait de ces informations.

Citation

Langlois-Bertrand, S., Mousseau, N., Vaillancourt, K., Bourque, M. 2024. Trajectoires pour un Canada carboneutre – Horizon 2060. Dans Langlois-Bertrand, S., Mousseau, N., Beaumier, L. (Dir.), Perspectives énergétiques canadiennes 3^e édition, Institut de l'énergie Trottier – Polytechnique Montréal [En ligne] <http://iet.polymtl.ca/perspectives-energetiques/> (page consultée le jour/mois/année).

ISBN: 978-2-924597-22-4

version 20240619

À propos de l'Institut de l'énergie Trottier (IET)

Créé en 2013, grâce à un don généreux de la Fondation familiale Trottier, l'IET a pour but d'aider à former une nouvelle génération d'ingénieurs et de scientifiques qui comprennent les enjeux énergétiques, de soutenir la recherche de solutions durables pour aider à accomplir la transition qui s'impose et de contribuer à la diffusion des connaissances et aux débats sur les questions énergétiques. Basé à Polytechnique Montréal, l'IET rassemble des professeurs-chercheurs de HEC, de Polytechnique et de l'Université de Montréal. Cette diversité d'expertises permet la formation d'équipes de travail transdisciplinaires, condition essentielle à la compréhension systémique des enjeux énergétiques dans le contexte de lutte aux changements climatiques.

À propos de ESMIA Consultants

ESMIA offre une expertise de pointe en modélisation de systèmes intégrés 3E (Énergie-Économie-Environnement) pour l'analyse de stratégies énergétiques et climatiques optimales. ESMIA met de l'avant une approche scientifique guidée par des modèles mathématiques sophistiqués. L'optique derrière notre implication est de proposer des solutions permettant l'atteinte des objectifs énergétiques et climatiques sans compromettre la croissance économique. Depuis 20 ans, les consultants ESMIA fournissent une gamme complète de services pour le développement de modèles technico-économiques détaillés pour le compte de prestigieuses organisations à travers le monde. Ils offrent également leurs services-conseils pour l'analyse de problématiques complexes, dont la sécurité énergétique, l'électrification, les feuilles de routes technologiques et les transitions énergétiques. ESMIA bénéficie à cet effet de son propre modèle d'optimisation intégré pour l'analyse exhaustive des politiques énergétiques et climatiques en Amérique du Nord.

À propos du Pôle e3c

Le Pôle e3c est un pôle multidisciplinaire de recherche, transfert et de formation de HEC Montréal, spécialisé en environnement, énergie et économie circulaire. Sa mission est de contribuer à une transition vers une société et une économie durable, en lien avec différentes parties prenantes. Pour ce faire, le Pôle e3c conduit des recherches, anime une programmation scientifique, et conçoit et organise des formations et des écoles d'été.



Résumé

Cette troisième édition des Perspectives énergétiques canadiennes est le résultat d'un effort de modélisation qui, tout en accordant une attention particulière au système énergétique, vise à analyser diverses trajectoires de transformation susceptibles de permettre au Canada d'atteindre la carboneutralité. Rédigée par des chercheurs indépendants, cette série de rapports a d'abord présenté un portrait à jour des secteurs canadiens de la production et de la consommation d'énergie (Langlois-Bertrand et Mousseau 2024). Le deuxième rapport de la série, présenté ici, s'appuie sur une modélisation technico-économique approfondie pour analyser les tendances que l'on peut observer dans le pays. Il examine ainsi, province par province, les trajectoires optimales en termes de coût permettant de transformer le secteur de l'énergie et réduire les émissions globales de GES au cours des prochaines décennies, et ce, en fonction des politiques actuelles et à venir ainsi que des objectifs nationaux en matière de carboneutralité. Suivront, au cours des prochains mois, des analyses en profondeur de certaines questions soulevées par la modélisation. Cette 3e édition fait suite à des travaux similaires qui ont été effectués dans les éditions précédentes des Perspectives énergétiques canadiennes en 2018 et 2021.

Ce rapport adopte une forme traditionnelle et effectue une projection de la production et de la consommation d'énergie du Canada dans les prochaines décennies selon ces différents scénarios, tout en comptabilisant les émissions de GES du pays, y compris celles qui sont générées en dehors des activités liées à l'énergie, telle que celles provenant de l'agriculture, des déchets et des processus industriels, de même que les émissions fugitives du secteur de la production de pétrole et de gaz naturel. Il se concentre également sur la transformation qui s'opère présentement dans le secteur énergétique du Canada, en analysant l'impact de cette transformation sur l'économie générale et la dépendance de celle-ci à l'égard de diverses mesures de réduction des émissions de GES prises par les provinces et le gouvernement fédéral.

Les résultats obtenus font ressortir les éléments suivants :

- (i) L'atteinte de l'objectif de carboneutralité impose que l'ensemble des choix orientant la transition de l'économie canadienne soient compatibles dès aujourd'hui avec la carboneutralité à long terme;
- (ii) Si les mesures actuellement mises en œuvre et annoncées publiquement, aux niveaux fédéral et provincial, permettent d'entrevoir une réduction des émissions du pays à court terme, elles demeurent insuffisantes pour permettre l'atteinte des objectifs de réduction des émissions de 2030;
- (iii) Dans une perspective d'optimisation des coûts, les secteurs pétrolier et gazier, l'industrie et la production d'électricité devraient assumer la majeure partie de la réduction des émissions dans les années à venir;
- (iv) Grâce à l'adoption rapide de mesures appropriées et de diverses améliorations technologiques, la transition vers une économie carboneutre pourrait s'avérer abordable en termes de coûts, voire même bénéfique sur le plan économique.

Les scénarios menant à la carboneutralité

Tout au long de ce rapport, nous examinons deux scénarios de réduction des émissions de GES menant à la carboneutralité ainsi qu'un scénario de référence pour la situation de statu quo qui inclut les politiques déjà en vigueur (voir les descriptions dans le tableau ES.1). Tous les scénarios sont analysés par l'entremise du modèle NATEM, un modèle qui cherche la solution technico-économique optimale respectant les contraintes imposées, livrant ainsi une borne inférieure quant aux coûts de la transition.

Tableau ES.1 – Description du scénario de référence et des scénarios de réduction des émissions de GES utilisés dans la modélisation NATEM¹

Nom	Description sommaire
REF	<p>Le scénario de référence</p> <p>Ce scénario ne comprend pas d'objectifs contraignants de réduction des émissions de GES.</p> <p>Les hypothèses macroéconomiques qu'il comprend (PIB, population, prix des exportations de pétrole et de gaz) correspondent aux projections de la Régie de l'énergie du Canada et de Statistique Canada et n'imposent aucune contrainte supplémentaire en matière d'émissions de GES.</p> <p>Ce scénario comprend toutes les politiques en matière d'énergie et de réduction des GES qui sont déjà en vigueur et inclut également le Règlement sur l'électricité propre et les objectifs de ventes de Véhicules Zéro Émission.</p>
NZ50	<p>Ce scénario impose un objectif consistant à atteindre la carboneutralité sur la totalité de l'équivalent CO₂ d'ici 2050, ainsi qu'un objectif visant à réduire les émissions de GES de 40% d'ici 2030 par rapport au niveau de 2005.</p>
NZ50PS	<p>Ce scénario est identique au scénario NZ50, à l'exception des projections de coûts pour les PRM nucléaires qui sont plus élevées.</p>

¹ Le North American TIMES Energy Model (NATEM) est un modèle d'optimisation des systèmes énergétiques développé et mis en œuvre par la firme ESMIA Consultants. Il utilise le générateur de modèle du système intégré MARKAL-EFOM (TIMES), développé et distribué par le Programme d'analyse des systèmes de technologie énergétique (ETSAP) de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) et utilisé par des institutions dans près de 70 pays.

L'impact des mesures mises en place

En contraste marqué avec la précédente édition de ces Perspectives énergétiques canadiennes, les politiques en vigueur ou sur le point de l'être infléchissent la courbe des émissions du pays. En effet, l'impact projeté de plusieurs des mesures récentes et à venir nous mène à projeter une réduction de 14% des émissions du Canada d'ici 2030 par rapport à leur niveau de 2005, et de 25% d'ici 2050. Ces mesures permettent de réduire l'écart, et notamment sur le court terme, entre les scénarios REF et NZ50. De plus, le scénario REF montre que les mesures ciblées ont un impact réel, comme l'illustre bien l'exemple de l'objectif de ventes de VZE qui entraîne de fait une décarbonation complète des véhicules légers.

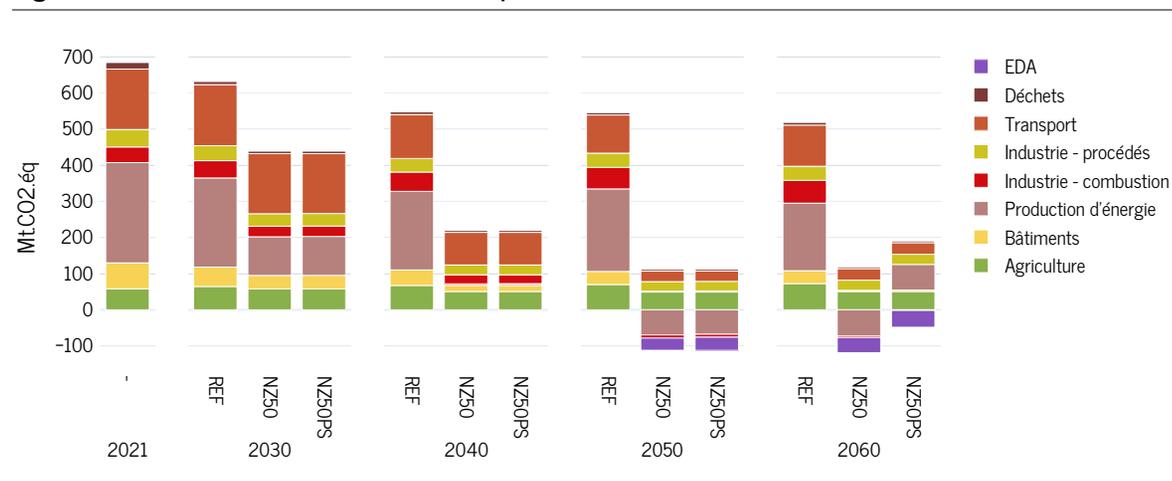
Ces mesures demeurent toutefois largement insuffisantes pour espérer atteindre la cible de réduction de GES de -40% pour 2030, ou pour jeter des bases solides pour mettre le pays sur la voie de la carboneutralité. Il est important de noter que la majeure partie de ces récents développements proviennent du gouvernement fédéral, alors que les provinces se sont largement abstenues de déployer de nouvelles mesures structurantes capables de contribuer à la décarbonation de la société canadienne

Décarboner tous les secteurs économiques

Les résultats de la modélisation permettent de faire le premier constat suivant : **si l'on veut atteindre la carboneutralité à un coût raisonnable, il est nécessaire que tous les secteurs dans toutes les provinces et territoires s'engagent dans une décarbonisation en profondeur.** En effet, le défi d'atteindre la carboneutralité exige non seulement la réduction des émissions à leurs plus bas niveaux possibles, mais aussi la compensation des émissions restantes qui sont trop coûteuses à éliminer. Ce deuxième volet comprend les utilisations particulières qui devraient continuer d'être en demande, mais dont la décarbonisation est trop coûteuse ou requiert une technologie qui n'est pas encore disponible, comme dans le secteur de l'agriculture ou dans les procédés industriels.

De plus, une fois la carboneutralité atteinte, la majorité des émissions restantes ne seront pas liées à la combustion de combustibles fossiles, ce qui représente un défi différent de la réduction des émissions liées à la consommation d'énergie, car leur élimination nécessite des innovations technologiques révolutionnaires dont l'évolution et le développement sont difficiles à prévoir.

Figure ES.1 – Les émissions totales de GES par secteur



La transformation des services énergétiques

La part des combustibles fossiles subit dans les scénarios de carboneutralité une diminution considérable qui débute avant 2030 et s'accélère ensuite rapidement entre 2030 et 2040. En 2060, la consommation de pétrole et de gaz représente 14 % de ce qu'elle était en 2021 pour chacune de ces sources. **Compte tenu du rythme rapide des transformations qui sont nécessaires, le gaz naturel ne pourra donc pas jouer le rôle d'énergie de transition.**

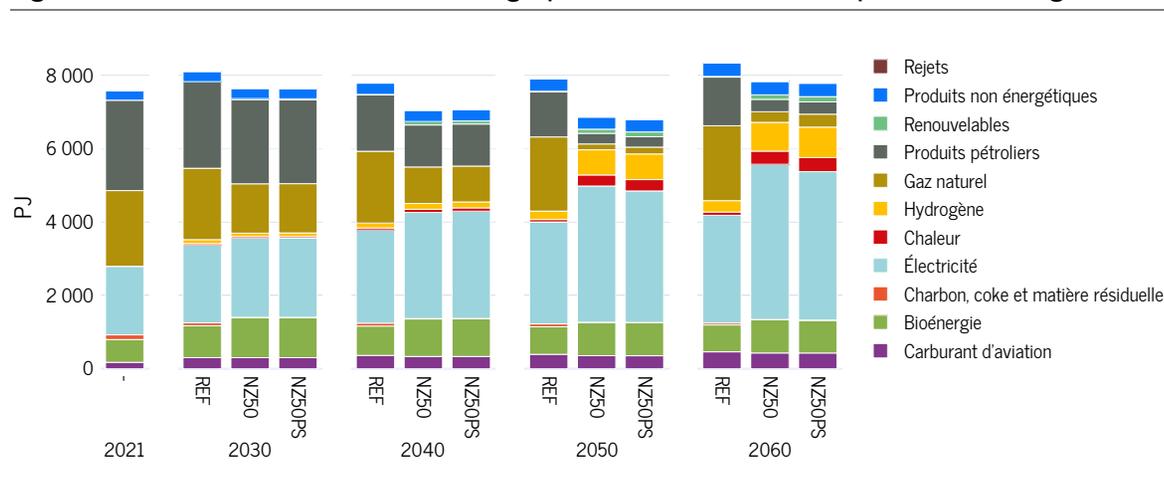
Jusqu'en 2050, les scénarios menant à la carboneutralité impliquent une réduction de la demande énergétique. Cette évolution s'explique en grande partie par une amélioration de l'efficacité énergétique et de la productivité découlant surtout des travaux d'électrification. Ces réductions se font sans diminution des services aux citoyens. Après 2050 toutefois, alors que les transformations les plus rentables auront été réalisées à l'aide de technologies qui sont actuellement connues, la satisfaction de la demande croissante d'énergie par une population en augmentation se traduira alors par un accroissement net de la consommation énergétique.

La décarbonation des bâtiments

Dans l'ensemble, en matière de chauffage des locaux, le remplacement des systèmes alimentés aux combustibles fossiles par l'électricité est une mesure essentielle pour permettre la réduction des émissions de GES dans les secteurs commercial et résidentiel, et ce, même à court terme. Ces prévisions suggèrent qu'il est possible de décarboner le secteur du bâtiment à un coût relativement faible à l'aide de technologies qui sont présentement disponibles. Des transformations compatibles avec l'atteinte de la carboneutralité sont déjà en cours dans le secteur du bâtiment, comme le reflète le scénario REF, puisque les thermopompes, l'amélioration de l'enveloppe des bâtiments ainsi que d'autres technologies entraînent de gains d'efficacité considérables tout en éliminant les émissions. Toutefois, le rythme et l'ampleur de la transformation dans le scénario REF sont loin d'être suffisants pour répondre aux exigences d'une trajectoire menant à la carboneutralité.

Bien sûr, à mesure que l'électrification du chauffage des bâtiments accroît la demande de pointe d'électricité en hiver, diverses stratégies carboneutres devront être mises en œuvre pour éviter une surabondance de création d'infrastructures de production et de distribution d'électricité sans nuire à la réduction des émissions de GES.

Figure ES.2 – La consommation finale d'énergie par source (en dehors de la production d'énergie)



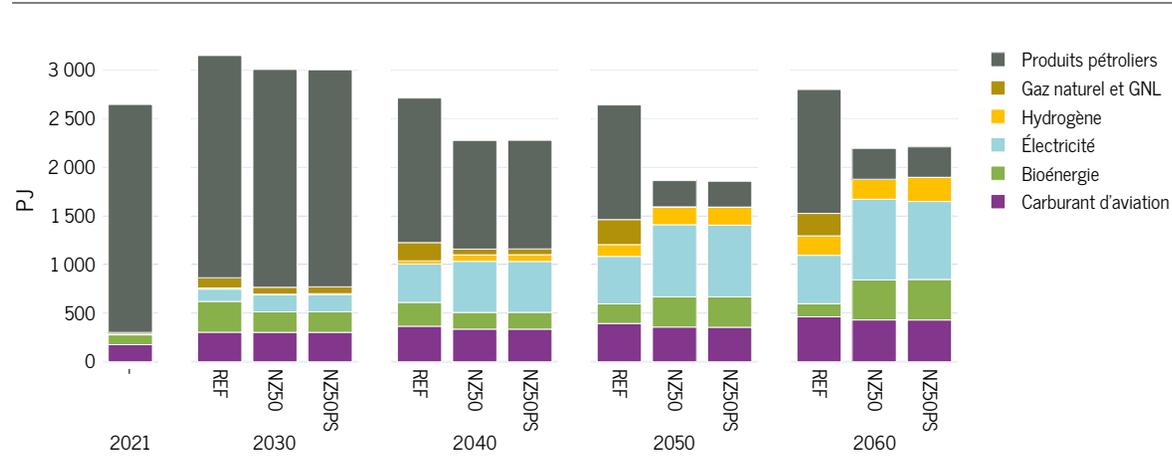
Les défis du secteur du transport

Le secteur du transport est responsable de 30% des émissions de GES du Canada et a vu sa part augmenter de manière presque continue au cours des 20 dernières années. L'impact de la pandémie de COVID-19, avec les restrictions sur le transport aérien et l'augmentation du travail à la maison, a rapidement fait chuter la demande en transport, mais surtout pour le transport de passager en 2020. À partir de 2022 toutefois, le rebond a été majeur, et aucune baisse similaire dans la demande n'est prévue pour le futur. Au contraire, celle-ci devrait retrouver sa tendance à la hausse continue.

Malgré ce retour à la croissance de la demande, l'électrification des transports prévue dans les scénarios de carboneutralité, se traduit par une réduction de 29,6% de la demande d'énergie de ce secteur; cela démontre bien l'inefficacité remarquable des moteurs thermiques, imposée par les lois de la thermodynamique. Bien que l'obligation de vente de véhicules à zéro-émission mène à l'électrification du transport routier de passager dans le scénario REF, l'absence de mesures touchant d'autres sous-secteurs pour le moment font que la décarbonation du secteur se limite largement au seul sous-secteur des véhicules légers.

La transformation du secteur du transport est au cœur des efforts de réduction des émissions de GES, mais elle est difficile à réaliser et prendra du temps, en raison des coûts plus élevés et des défis technologiques liés au transport de marchandises, hors route, aérien et maritime. Pour le transport lourd, la transformation du secteur dépend d'un certain nombre de technologies concurrentes qui ne sont pas encore disponibles à grande échelle sur le marché. En raison de l'importance de la standardisation et de la nécessité de se doter d'infrastructures spécifiques aux différentes technologies (dispositif de recharge, caténaires, hydrogène), ce sont les choix politiques plutôt que le coût des technologies qui détermineront en grande partie l'importance relative de celles-ci. Une approche qui prend en compte les caractéristiques régionales sur les principaux axes de transport peut également s'avérer plus efficace compte tenu des différentes options possibles.

Figure ES.3 – La consommation finale d'énergie du secteur des transports, par carburant



Du fait qu'on ne lui accorde pas suffisamment d'attention, le secteur hors route continue de jouer un rôle important dans le maintien du volume considérable d'émissions provenant du secteur des transports en 2050 dans tous les scénarios. Quant à elles, les transformations du transport maritime et aérien sont plus coûteuses et souffrent de l'absence de solutions technico-économiques viables. Ce constat souligne l'importance de contrôler la croissance de la demande pour ces sous-secteurs, un élément clé de toute trajectoire menant à la carboneutralité, et cela tout en accroissant les investissements pour pouvoir poursuivre le développement des technologies.

Les combinaisons de stratégies dans le secteur industriel

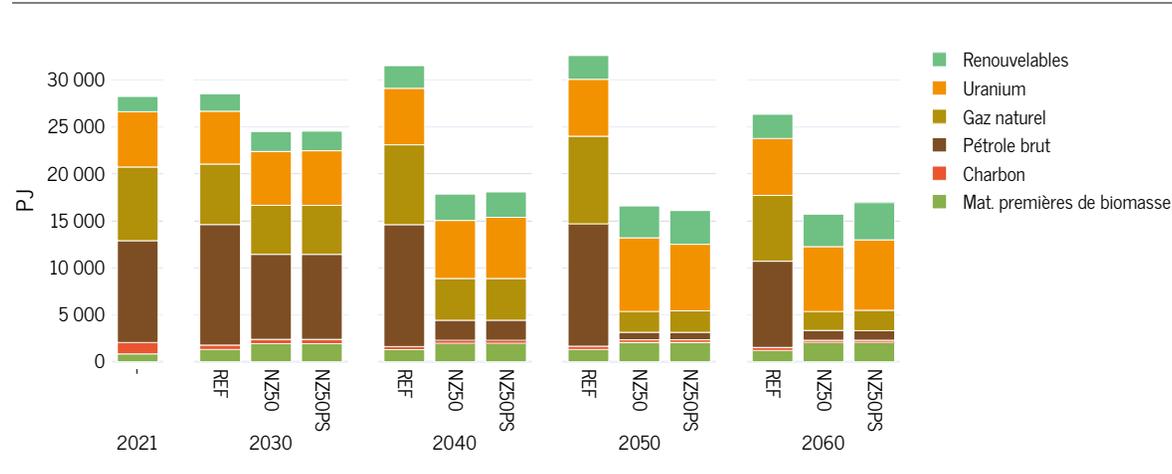
Le bouquet énergétique qui alimente actuellement le secteur industriel, et dans lequel la bioénergie et l'électricité jouent déjà un rôle majeur, suggère qu'il n'y a que très peu de solutions faciles pour décarboner ce secteur à court et moyen terme. Après 2040, le scénario NZ50 prévoit une décarbonation rapide des sources restantes d'émissions de GES (notamment le gaz naturel) pour respecter la contrainte de la carboneutralité. L'hydrogène joue un rôle important dans cette décarbonation après 2040, en particulier dans les sous-secteurs de la fabrication et des pâtes et papiers.

La décarbonation du secteur de l'industrie passe par des innovations dans les procédés qu'il utilise, en plus d'adopter de nouvelles mesures supplémentaires dans le but de transformer son bouquet énergétique. Ce portrait de la situation montre que la décarbonation de l'industrie requiert l'adoption d'approches qui soient adaptées à des secteurs spécifiques ainsi qu'aux procédés particuliers qu'ils utilisent. Il est donc nécessaire de concevoir dès que possible des feuilles de route pour les principaux secteurs afin de pouvoir étudier notamment les possibilités de développer des procédés générant des émissions à faible teneur en carbone tout en étant économiquement viables. Si ces différentes recommandations ne devaient pas connaître de suite, la décarbonation des procédés industriels au Canada deviendrait alors largement tributaire des efforts et des réglementations qui seraient adoptées ailleurs, dans d'autres régions du monde.

L'agriculture sera responsable d'une plus grande part des émissions

Bien que l'agriculture ne représente que 8,5% des émissions actuelles de GES, elle devrait devenir la plus grande source d'émissions restantes dans les scénarios menant à la carboneutralité en générant un volume d'environ 49 Mt éq. CO₂, soit 44% des émissions nettes restantes en 2050 et 2060. Les émissions agricoles proviennent à la fois de la combustion d'énergie, comme celle utilisée pour le chauffage et l'éclairage par exemple, de même que des émissions générées par certains procédés tels que la fermentation entérique ou celles en provenance des sols. Dans ce secteur, s'il est possible de décarboner la production de chaleur, il n'existe que très peu de solutions à faibles émissions de carbone actuellement disponibles pour décarboner les émissions liées aux procédés. Or, ces émissions représentent, et de loin, la part la plus considérable des émissions provenant de l'agriculture, soit 95% des

Figure ES.4 – La production d'énergie primaire



émissions qui ne proviennent pas des véhicules (celles-ci étant catégorisé sous le transport hors route, et sont presque totalement électrifiées dans les scénarios de carboneutralité).

La production énergétique du Canada dans une économie carboneutre

En suivant les tendances actuelles (scénario REF), la production énergétique du Canada (Figure ES-4) devrait continuer à croître jusqu'en 2050. Elle continuera d'être dominée par la production pétrolière, avant de diminuer après 2050 en raison d'une baisse des exportations. La production de gaz naturel connaîtra une croissance lente jusqu'en 2050 avant de revenir, elle aussi, à ses niveaux inférieurs à ceux de 2021 en 2060. La production de gaz naturel est davantage affectée par la dynamique de la demande intérieure que celle de pétrole brut.

Tous les scénarios menant à la carboneutralité nécessitent une transformation accélérée de l'économie et un désengagement par rapport à l'industrie des combustibles fossiles, et ce même avant 2030. Si l'on ne devait pas parvenir à atteindre cet objectif dans le délai prévu, il faudrait alors réaliser plus rapidement des réductions d'émissions de GES plus difficiles à obtenir dans d'autres secteurs et capter une quantité toujours plus grande d'émissions pour pouvoir atteindre la carboneutralité, ce qui augmenterait le coût associé à ces trajectoires.

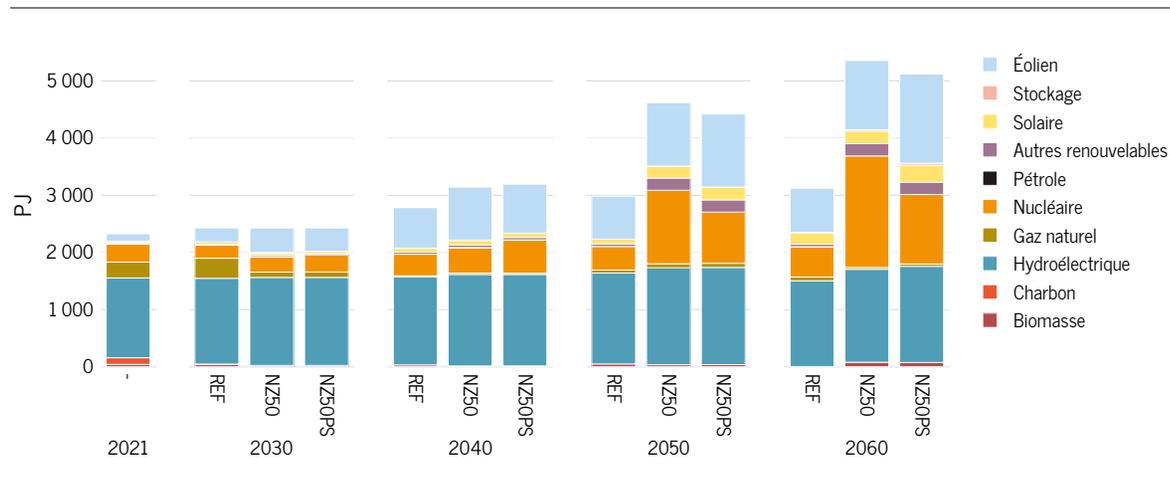
Un secteur de l'électricité net négatif

Avec la diminution des coûts liés aux technologies électriques ainsi qu'à la production et au stockage de l'électricité, l'électricité joue un rôle central dans les trajectoires de décarbonation. Sa part de la consommation finale canadienne, qui s'élève actuellement à 24 %, croîtra pour atteindre 52 % en 2050 et 54 % en 2060 dans les scénarios menant à la carboneutralité.

Si la production d'électricité augmente considérablement même dans le scénario REF à la suite de la croissance attendue de la demande, on observe que cette production s'accroît bien plus spectaculairement pour pouvoir répondre aux besoins qu'impose la transition énergétique vers une société carboneutre. Dans les scénarios menant à la carboneutralité, l'électrification massive des services énergétiques dans tous les secteurs oblige à doubler la capacité de production d'ici 2050 pour atteindre 1 280 TWh. Le scénario NZ50 montre également que cette croissance s'accélère de manière considérable avec le temps. D'ici 2030 en effet, les niveaux de production compris dans ce scénario suivent une courbe similaire à ceux du scénario REF et s'accroissent de 4,6 %. Cette observation souligne les similitudes qui existent dans les facteurs stimulant l'électrification à très court terme dans les scénarios REF et NZ50, ceux-ci étant largement imposés par la réglementation, notamment celle qui touche le secteur des transports légers. Notons que les projections du scénario NZ50 reposent sur des hypothèses conservatrices en ce qui concerne la demande énergétique. Ainsi, celles-ci n'incluent pas l'installation potentielle de nouvelles industries énergivores en plus de poser que les technologies les plus efficaces sont déployées partout en remplacement des combustibles fossiles.

Après l'entrée en vigueur du Règlement sur l'électricité propre (REP), la production d'électricité à partir du gaz naturel diminue considérablement dans les scénarios REF et NZ50, et **le gaz naturel associé au CSC n'apparaît pas comme une source énergétique principale.** Selon les projections de coûts actuelles, ce sont plutôt **l'éolien, le solaire et les petits réacteurs nucléaires modulaires (PRM) qui deviennent les plus grandes sources de production d'électricité dans le scénario NZ50.** En matière de production nucléaire, la principale différence entre les scénarios réside dans l'étendue du déploiement de ces sources, et en particulier des PRM. Étant donné les facteurs de capacité supérieurs du nucléaire, l'on suppose en effet que ce déploiement pourrait être réalisé à coût moindre et permettrait de fournir les quantités supplémentaires d'énergie que nécessite le scénario NZ50.

Figure ES.5 – La production d'électricité par technologie



Étant donné l'incertitude qui subsiste sur les PRM, pour lesquels aucune installation n'est actuellement en opération, des hypothèses plus pessimistes reflétées dans le scénario NZ50PS prévoient un déploiement moins important de cette technologie, lequel serait alors compensé par la croissance d'autres sources de production d'électricité dans le bouquet énergétique. L'avenir des PRM est assombri par des incertitudes qui vont bien au-delà de la question de leurs coûts, comme l'acceptabilité sociale et les délais de construction.

La contribution de la biomasse au bouquet de sources d'électricité est étroitement liée à la nécessité d'obtenir des émissions négatives. La production d'électricité à partir du bois ne représente aujourd'hui qu'une faible part de la production totale, soit 1,5 %. Dans le scénario REF, les niveaux restent relativement constants d'ici 2050, mais dans le scénario NZ50, cette production est en grande partie réalisée dans des installations de bioénergie avec captage et séquestration du carbone (BECS), contribuant de ce fait à générer des émissions négatives. Ce changement n'intervient toutefois qu'après 2040, ce qui souligne le coût élevé de cette production. Celle-ci continue néanmoins à s'accroître jusqu'en 2060, car il est nécessaire de générer davantage d'émissions négatives et de faire de la production d'électricité un secteur négatif en termes d'émissions nettes, pour parvenir à maintenir l'équilibre de la carboneutralité.

Le paradoxe de la production pétrolière et gazière

Le Canada est un important producteur et exportateur d'énergie. À ce titre, **son profil de production et d'exportation d'énergie sera profondément affecté à la fois par l'évolution de la demande et par les contraintes imposées sur les émissions de GES.** Comme la technologie de CSC n'est pas concurrentielle par rapport aux prix de l'énergie projetés, la production de pétrole et de gaz subit une diminution considérable dans les scénarios de carboneutralité, de l'ordre de 16 % même avant 2030 dans le scénario NZ50 afin que les émissions provenant de cette production demeurent compatibles avec les objectifs de carboneutralité à plus long terme. Avant 2050, 93 % de cette production est éliminée. Ainsi, **dans une trajectoire menant à la carboneutralité qui est optimale au niveau des coûts, la production de pétrole et de gaz subit une réduction drastique et rapide**, sans quoi des réductions additionnelles très coûteuses seraient nécessaires ailleurs dans l'économie.

La contribution évolutive pour la bioénergie

La production de biomasse augmente rapidement afin de pouvoir répondre aux besoins croissants de la demande à court terme. Elle pourrait ainsi contribuer de manière décisive à la réalisation de réductions d'émissions à court terme, tout en assurant la maîtrise des coûts afférents, et ce sans entraver les transformations ultérieures. Au-delà d'un certain point cependant, la disponibilité de la biomasse et les émissions résiduelles associées à son utilisation se conjuguent pour limiter son importance lorsque l'on se rapproche de la carboneutralité.

Le rôle croissant de la bioénergie n'est donc pas le même dans les scénarios de carboneutralité. Dans ceux-ci, les utilisations principales de la bioénergie sont concentrées sur la possibilité d'obtenir des émissions négatives par le biochar, associé à la production de gaz de synthèse, ou dans la production d'électricité et d'hydrogène associée à la BECSC.

Les variations entre les provinces en matière de contribution à l'atteinte de la carboneutralité

Il est important de se rappeler que pour optimiser les dépenses totales, les contraintes sur les émissions de GES imposées dans nos scénarios s'appliquent à l'échelle nationale plutôt que par province et territoire. Par conséquent, **selon leur profil énergétique, certaines provinces et certains territoires qui bénéficient d'options de décarbonisation plus avantageuses pourront passer à des émissions nettes négatives, tan-**

dis que d'autres présenteront un bilan GES qui n'atteint pas la carboneutralité. Par exemple, la production d'énergie subira une transformation différente selon les provinces en fonction de la répartition des ressources, de leur disponibilité et de l'évolution du marché d'import/export, ce dernier point revêtant une importance considérable du fait que plus de la moitié de la production d'énergie primaire au Canada est destinée à l'exportation.

Comme le rapport complet le montre en détails pour chacune des provinces et territoires, il existe entre les provinces une grande diversité en matière de production et de consommation d'énergie, ce qui entraîne des défis différents, à court et à long terme, en ce qui concerne leur contribution à l'effort national visant l'atteinte de la carboneutralité au moindre coût. Par exemple, les provinces dotées d'un système électrique décarboné et d'un secteur industriel restreint doivent entreprendre très tôt la transformation des secteurs plus coûteux à décarboner, comme celui du transport; l'inverse est vrai pour les provinces ayant des industries à forte intensité d'émissions, comme la production de pétrole et de gaz, ou une production d'électricité à forte intensité de carbone, car la réduction des émissions de ces activités peut être réalisée rapidement et à un coût relativement faible. De même, en raison du coût élevé du transport de la biomasse, la disponibilité des matières premières dans chaque province est un facteur important à considérer pour déterminer si les résultats d'une province donnée incluent la production d'électricité et/ou d'hydrogène associée au BECSC et, par conséquent, le volume d'émissions négatives de ladite province.

Même si de nombreuses solutions sont applicables au niveau local ou relèvent de compétences provinciales, certains problèmes offrent un bon terrain d'entente et pourraient bénéficier du déploiement d'efforts entrepris à l'échelle du pays. Les transports, par exemple, devraient être considérés dans une perspective nationale. Il est également possible dans toutes les provinces de décarboner rapidement certaines utilisations spécifiques, telles que le chauffage des locaux dans les bâtiments. D'autre part, les provinces qui ont actuellement une production d'électricité à forte intensité d'émissions et une faible production hydroélectrique de base sont confrontées à des défis plus importants en matière de développement d'infrastructure de réseau; un plan national visant à soutenir les interconnexions provinciales pourrait faciliter la transformation nécessaire de la production d'électricité, et ce, pour ces provinces en particulier.

Quelques enjeux liés aux trajectoires vers la carboneutralité

La différence entre une réduction importante des émissions et la carboneutralité

Les scénarios menant à la carboneutralité montrent une très grande quantité d'émissions restantes en 2050, tous secteurs confondus, de l'ordre de 172 à 196 Mt éq. CO₂ par année, soit environ le quart des émissions actuelles. Ces scénarios montrent bien les lacunes qui affectent les solutions technologiques à faibles émissions de carbone. Ils soulignent également le rôle essentiel que peuvent éventuellement jouer les technologies de captage et de stockage du carbone (CSC) pour contribuer à atteindre la carboneutralité si elles sont utilisées de manière judicieuse dans des secteurs clés, notamment l'extraction directe de CO₂ dans l'atmosphère (EDA) et la bioénergie associée au CSC (BECSC). L'accroissement de la production et de l'utilisation du gaz de synthèse, qui entraîne des émissions négatives grâce au sous-produit du biochar, joue également un rôle important dans cette compensation.

Pour éviter de recourir à de telles quantités de compensation, il est urgent de s'intéresser davantage à certains secteurs qui sont peu susceptibles de se transformer rapidement en raison de l'évolution de la situation économique, comme c'est le cas du transport de marchandises lourdes par exemple. Il sera également essentiel de s'intéresser aux secteurs dont les émissions n'ont reçu que peu d'attention jusqu'à présent malgré le rôle croissant qu'elles seraient susceptibles de jouer à l'avenir. Parmi ceux-ci, mentionnons le transport hors route dans lequel les émissions proviennent d'un ensemble diffus de sources, mais où il y aurait possibilité de réaliser des réductions à un coût relativement faible. L'analyse des résultats du scénario NZ50 montre aussi clairement la difficulté que l'on rencontre lorsque l'on cherche à éliminer complètement les émissions provenant des procédés agricoles et industriels.

Réserver le captage et le stockage de carbone (CSC) aux émissions inévitables

Les résultats de la modélisation suggèrent que **la technologie de CSC sur site s'appliquera en priorité aux procédés industriels dont les émissions de CO₂ sont presque inévitables, ainsi qu'à la production de chaleur, d'hydrogène et d'électricité à partir de la biomasse où l'impact net du CSC sur les émissions est largement négatif.** La bioénergie associée au captage et au stockage du carbone (BECSC) s'appuie sur une technologie actuellement disponible et permet de produire

de l'électricité ou de l'hydrogène ainsi que de la chaleur dans le cadre d'utilisations industrielles. La contribution du gaz de synthèse, qui permet de stocker des émissions additionnelles dans les sols par les amendements au biochar, pourrait également s'avérer importante.

Le captage du carbone est une technologie principalement utilisée dans l'industrie et la production d'hydrogène et d'électricité à partir de la BECSC. Cela s'explique en grande partie par le fait que **l'objectif d'atteindre la carboneutralité plutôt que de simples réductions des émissions de GES modifie le lieu où s'effectue le captage du carbone. En effet, toutes les fuites de carbone, c'est-à-dire les émissions qui ne sont pas captées par des installations de CSC, doivent être compensées par des émissions négatives ailleurs dans le système, ce qui augmente le coût total des activités de captage et favorise les approches non émettrices par rapport au CSC et, plus encore, au CUC.**

Bien que le recours au captage du carbone soit un élément central des scénarios menant à la carboneutralité, les coûts et les incertitudes technologiques associés à cette pratique constituent un avertissement important de ne pas pécher par un excès d'optimisme sur leur réel potentiel. Il pourrait s'avérer nécessaire, notamment, de compenser l'évaluation trop optimiste du volume des émissions susceptibles d'être captées en recourant encore davantage à la technique d'extraction directe dans l'air (EDA) ainsi qu'à la production d'énergie à émissions négatives, cette dernière étant cependant limitée par la disponibilité de la biomasse. Toutefois, l'avertissement ci-dessus s'applique également à ces options : presque aucune installation de ce type n'est en opération à l'heure actuelle, et plusieurs risques et inconnues sont également associés au stockage continu de carbone à grande échelle. **S'il est urgent d'étudier plus sérieusement le potentiel réaliste de ces options de compensation, il semble qu'il soit crucial de consacrer au moins autant d'effort au développement d'innovations en matière de réduction des émissions qu'aux techniques de captage du carbone.**

Le déploiement des infrastructures pour permettre et soutenir la carboneutralité

L'accroissement de la production d'électricité requise pour pouvoir correspondre aux projections de la demande souligne l'urgence de résoudre les problèmes de mise en œuvre; elle met aussi en lumière le fait que maintenir le statu quo ne sera pas suffisant pour pouvoir répondre aux besoins dans l'avenir. Les projections de la demande d'électricité montrent clairement qu'il sera nécessaire de se doter d'importantes nouvelles infrastructures pour augmenter la capacité de production et améliorer la gestion de l'alimentation électrique ainsi que la réponse à la demande. Des investissements importants seront également nécessaires afin de moderniser les réseaux de distribution pour répondre à l'évolution des profils de demande qui se transformeront à la suite de l'électrification de nombreux services auparavant alimentés par d'autres sources d'énergie. L'accroissement de la capacité des infrastructures électriques pour atteindre les niveaux suggérés par les scénarios menant à la carboneutralité nécessite donc d'adapter de toute urgence une planification stratégique de ces travaux afin de parvenir à résoudre ou à relever les défis de mise en œuvre (voir l'encadré 3.1), y compris l'élaboration d'une vision de la situation à l'horizon 2050 qui soit claire.

Le rôle incertain de la bioénergie et de l'hydrogène

De nombreux facteurs rendent difficile l'évaluation du rôle exact que joueront la bioénergie et l'hydrogène dans les trajectoires menant à la carboneutralité, puisque plusieurs facteurs au-delà des coûts laissent planer des incertitudes en ce qui concerne les spécificités de leur déploiement. D'abord, les sources d'hydrogène et de bioénergie peuvent être utilisées dans de nombreuses technologies dont plusieurs sont interdépendantes, ce qui rendra interdépendantes les premières infrastructures construites en ce sens. De plus, les questions relatives à la transformation, au transport et à l'utilisation de ces deux sources d'énergie rencontrent des défis technologiques considérables. Même si le modèle utilisé leur attribue un coût, de grandes incertitudes demeurent quant à la capacité ou la volonté réelle de l'industrie de travailler à surmonter ces défis alors que l'on assiste actuellement à un développement de technologies à faible intensité de carbone qui sont compétitives.

Il demeure également difficile de comptabiliser les émissions associées à l'utilisation de la bioénergie à des fins de production d'émissions négatives, et ce même pour la production d'hydrogène vert. La disponibilité de la biomasse étant limitée, utiliser cette ressource pour obtenir des émissions négatives implique d'assurer un équilibre complexe dans le déroulement de l'ensemble de la transition énergétique. Il faudra notamment prendre en compte des facteurs comme l'utilisation de la biomasse dans la production d'électricité et d'hydrogène à partir de la BECSC ainsi que du biochar, la réduction des émissions d'activités qui sont difficiles à décarboner, etc.

Indépendamment des hypothèses sur la disponibilité de la biomasse, le rôle de la bioénergie dans les efforts de réduction des émissions illustre bien à quel point il est essentiel de gérer cette ressource avec grande précaution si son potentiel doit être exploité, et ce, notamment en raison de la concurrence d'utilisations non énergétiques.

Le coût décroissant des trajectoires menant à la carboneutralité

Comme aucun pays n'a encore achevé sa transition des combustibles fossiles à des sources d'énergie à faibles émissions de carbone, les implications économiques de ces transitions demeurent encore incertaines. Des évaluations divergentes suggèrent que les transitions énergétiques peuvent soit alimenter la prospérité future, soit devenir un fardeau économique. Les transitions nécessiteront des investissements importants, mais elles généreront également des économies.

Un examen des coûts marginaux inhérents à la réduction des émissions au fil du temps permet d'illustrer à quel point le défi de réaliser des réductions profondes devient plus difficile, et donc plus coûteux, avec le passage du temps. En comparant ces résultats avec ceux qui ont été obtenus dans les Perspectives énergétiques canadiennes de 2021 (Langlois-Bertrand et al. 2021), le coût marginal inhérent à la réduction de la dernière tonne de CO₂ dans le scénario NZ50 actuel est de 880 \$/tonne, tandis que le coût de la même dernière tonne à éliminer pour atteindre la carboneutralité en 2021 s'élevait à 1 100 \$. Les développements technologiques réalisés depuis la précédente édition des Perspectives ont contribué non seulement à fournir des solutions de réduction des émissions, mais également à réduire les incertitudes concernant les trajectoires technologiques possibles de même que leurs coûts, ce qui a permis d'arriver à réduire de manière considérable les coûts marginaux en moins de trois ans. Il est également possible d'observer ce fait dans l'écart qui existe entre les deux courbes avant que les réductions n'atteignent 80% des réductions nécessaires pour

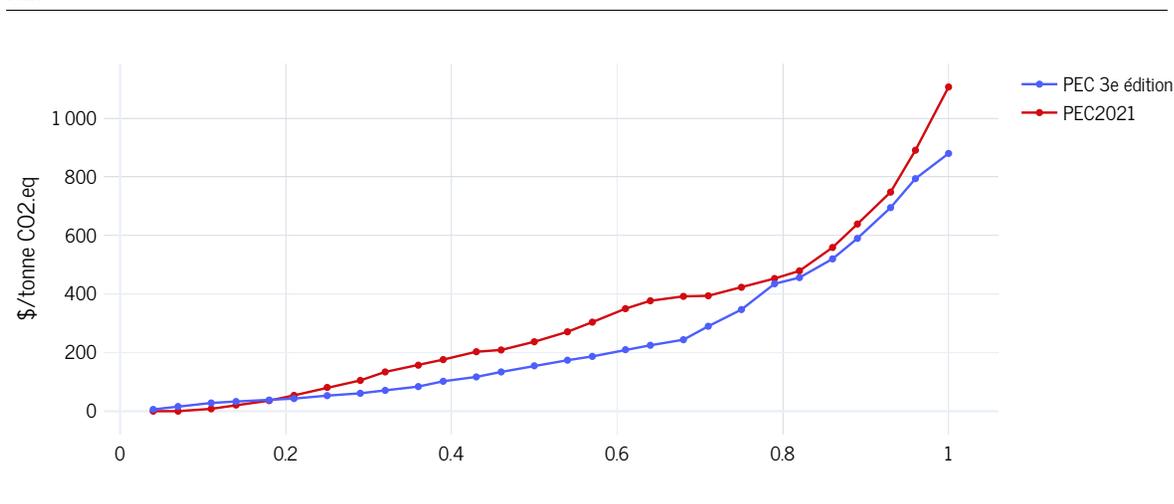
RÉSUMÉ

atteindre la carboneutralité. À ce moment précis, les coûts marginaux du scénario NZ50 de la présente édition sont nettement inférieurs à ceux de 2021, et ce, même si le scénario REF actuel réduit déjà les émissions bien au-delà de son équivalent de 2021.

Ce constat montre à quel point les coûts marginaux constituent un critère qui évolue rapidement. À mesure que l'on adopte des mesures importantes pour réduire les émissions, l'innovation entraîne une diminution du coût associé à la réalisation de réductions supplémentaires. Cette évolution se produit au fur et à mesure que de nouvelles technologies, solutions, approches et applications sont mises en place. En conséquence, les coûts marginaux projetés diminuent au cours de la transition. Plus important encore, à mesure que les pays avancent dans la transition, les niveaux plus élevés estimés pour la réduction de la dernière tonne deviennent moins pertinents, car ils affectent une plus faible proportion de réductions.

Toutefois, il importe également de souligner le fait que le prix marginal de réduction de la dernière tonne est contrôlé par notre estimation des technologies de captage et de stockage du carbone (CSC), aussi bien sur les sites industriels que dans les installations d'extraction directe de CO₂ dans l'atmosphère (EDA). Ces technologies présentent un certain nombre de défis physiques et techniques qui doivent encore être surmontés avant de pouvoir passer à leur déploiement à grande échelle. Cette incertitude contraste avec le cas des technologies à faibles émissions de carbone, qui sont moins coûteuses et dont le déploiement est déjà réalisé, ce qui leur permet de susciter une confiance beaucoup plus grande quant au rôle qu'elles peuvent jouer dans la transition énergétique.

Figure ES.6 – Le coût marginal des réductions de GES dans le scénario NZ50 par rapport au scénario REF



Il est nécessaire d'améliorer les réglementations, les programmes et les contraintes imposées sur les émissions

Les résultats du scénario de référence montrent que les règlements, les programmes et les contraintes qui s'appliquent actuellement aux émissions, incluant le Règlement sur l'électricité propre et l'obligation de ventes de véhicules à zéro-émission, sont insuffisants pour permettre au Canada d'atteindre ses objectifs de 2030 et 2050. Même en incluant les actions substantielles prises notamment par le gouvernement fédéral dans les dernières années, la réduction attendue atteint 14% pour 2030, nettement inférieur à l'objectif fédéral de réduction de 40 à 45% des émissions alors que l'ajout de l'impact supposé des solutions fondées sur la nature estimé par Environnement et Changement climatique Canada et des crédits carbone achetés à la Californie amènent seulement la réduction projetée à 20%.

Ce constat souligne le fait qu'il est presque structurellement impossible pour le Canada d'atteindre ses objectifs climatiques de 2030 et que, pour corriger le cours des choses à l'horizon 2050, il est urgent d'instaurer des politiques publiques supplémentaires qui précisent des indicateurs et des objectifs clairs et quantifiables, comme indiqué dans la conclusion de ce rapport. Une partie de cette réflexion doit se concentrer sur les implications qui résultent de la poursuite de l'objectif de la carboneutralité. Ces politiques devraient cibler sans tarder, et avec vigueur, les secteurs où le rythme de transformation constitue la seule différence entre les divers scénarios et où les incertitudes technologiques sont les moins importantes. En même temps, des feuilles de route et mesures structurantes doivent être élaborées pour cibler les secteurs où peu de réductions sont attendues, comme le transport lourd et hors route, les procédés industriels et l'agriculture.

Alors que les messages ciblant la sobriété énergétique et la responsabilisation des citoyens se multiplient, le rôle des actions quotidiennes des citoyens dans l'atteinte des objectifs de carboneutralité à l'horizon 2050 demeure très limité et ne touche que quelques secteurs. En raison de la structure de l'économie canadienne, moins de 20% de toutes les émissions de GES peuvent être attribués aux choix directs des citoyens, ceci incluant le chauffage résidentiel et le transport personnel, y compris les véhicules individuels. Les émissions indirectes associées à la consommation de divers produits peuvent être importantes, mais pour la grande partie des biens importés, ces émissions ne sont pas attribuées directement au Canada.

Il est donc important que les gouvernements concentrent leurs actions en premier lieu sur l'industrie et la production d'énergie et, plus généralement, sur les acteurs commerciaux, de façon à décarboner leurs activités et rendre significativement plus productive leur consommation d'énergie.

Les conclusions tirées de ces Perspectives

Les résultats et l'analyse présentés dans ces Perspectives permettent de tirer plusieurs conclusions importantes.

- 1. La carboneutralité change tout et l'objectif de 2030 ne doit pas entraver l'atteinte de l'objectif à long terme, c'est-à-dire la carboneutralité.** Compte tenu de l'urgence d'atteindre la carboneutralité, tous les efforts et les investissements consentis à partir de maintenant doivent viser l'avènement d'une société carboneutre et se concentrer tout particulièrement sur la carboneutralité intrinsèque d'un nombre maximal d'activités.
- 2. Même si certaines politiques qui ont récemment été mises en œuvre constituent un pas important dans la bonne direction, il reste encore beaucoup à faire, en particulier de la part des provinces.** Les politiques actuelles franchissent une étape importante en soutenant des transformations qui sont compatibles avec l'atteinte de la carboneutralité. Toutefois, comme l'indiquent les résultats des derniers chapitres, les mesures en vigueur sont loin d'être suffisantes pour permettre d'atteindre l'objectif de réduction des émissions de 2030 ou la carboneutralité d'ici 2050.
- 3. Construire l'épine dorsale du système énergétique qui permettra d'atteindre la carboneutralité d'ici 2050 est une tâche colossale qui requiert de planifier et de réaliser rapidement des transformations considérables des infrastructures tout en améliorant la productivité et en réduisant les coûts de ce déploiement.** Malgré l'inclusion de toutes les mesures d'efficacité énergétique viables sur le plan économique, les nouveaux besoins demeurent très vastes en matière d'infrastructures de production, de transport et de distribution d'énergie. Nos résultats sont également susceptibles d'être en deçà des véritables besoins, car la nature du modèle, qui est axée sur l'optimisation, suppose que les transformations entraîneront peu de frais généraux.
- 4. L'expansion spectaculaire du rôle de l'électricité dans le bouquet énergétique ne constitue pas simplement un défi en termes de construction d'infrastructures. Un tel développement nécessite de repenser complètement la manière de soutenir l'économie principalement grâce à l'électricité, ce qui est à l'opposé du bouquet énergétique traditionnel utilisé dans le passé.** Au-delà des questions techniques, ces changements s'accompagnent d'un besoin nettement plus considérable de réseaux résilients qui pourrait être sous-estimé, car il existe un nombre croissant de personnes qui dépendent de l'électricité pour assurer un plus grand nombre de services, y compris les plus essentiels. De plus, le développement industriel devra être planifié conjointement au déploiement des réseaux, largement en rupture avec le passé.
- 5. Il est nécessaire d'adopter des mesures supplémentaires pour le secteur des transports.** Bien que l'électrification des véhicules légers soit rendue probable grâce aux mesures en place, il est clair qu'il est nécessaire de mettre en œuvre des mesures vigoureuses pour décarboner les transports routiers et maritimes lourds ainsi que le transport hors route.
- 6. Les transformations nécessaires dans le secteur de l'industrie requièrent l'établissement de feuilles de route spécifiques, y compris pour les émissions liées aux différents procédés utilisés.** Les opportunités qui se présentent diffèrent considérablement selon les sous-secteurs et, dans tous les cas, les émissions des procédés industriels ne diminuent que de 46 % dans le scénario NZ50.
- 7. Il faut évaluer le rôle que peut jouer la biomasse dans les trajectoires de décarbonation en ne limitant pas sa contribution à la production de bioénergie.** Avec de meilleures données, il faudra réaliser des analyses comparatives des différentes options pour déterminer le potentiel réaliste de sa contribution aux trajectoires menant à la carboneutralité, comme par la décarbonation de la construction par exemple.

- 8. Il est urgent d'étudier et de planifier le déploiement d'options à émissions négatives.** Il faudra acquérir davantage d'expérience avec l'une ou toutes les technologies à émissions négatives afin d'avoir une évaluation plus réaliste de leur potentiel, et ce par l'entremise de projets pilotes et de certains essais réalisés à l'échelle commerciale.
- 9. Si la modélisation ne répond pas à toutes les questions que l'on peut se poser concernant l'avenir, elle donne néanmoins des indications sur la manière de réfléchir aux choix qui doivent être faits aujourd'hui pour nous permettre d'atteindre la carboneutralité.** L'évolution spécifique de notre compréhension des solutions basées sur l'agriculture et la nature demeure encore incertaine, voire même inconnue. Ce constat s'applique également pour les technologies qui sont actuellement en grand développement telles que l'hydrogène, les petits réacteurs nucléaires, le stockage d'énergie à grande échelle, de nombreux procédés industriels ainsi que le transport lourd. L'avenir de ces solutions et technologies dépend non seulement de la poursuite des activités de recherche et des progrès technologiques, mais également des orientations et des choix politiques qui permettront d'implanter très tôt certaines des solutions nécessitant de lourdes infrastructures, telles que les caténaires ou les camions alimentés à l'hydrogène et, ce faisant, réduire le nombre d'avenirs possibles à prendre en considération

Concilier discours et réalité: une responsabilité partagée

Les constats énoncés ci-dessus sont tirés des résultats de la modélisation ainsi que d'une analyse de l'évolution récente du système énergétique canadien et des émissions de GES du pays; ils devraient concerner tous les Canadiens. La constitution du Canada fait en sorte que la définition des objectifs climatiques et la responsabilité de les atteindre relèvent de la compétence de nombreux ordres de gouvernements. Au cours des deux dernières décennies, force est de constater que cette structure **a largement échoué à réaliser les transformations promises.** Les avancées récentes en termes de mesures structurantes demeurent rares au niveau des provinces, alors que le gouvernement fédéral actuel a déployé la majeure partie des efforts, qui demeurent insuffisants.

Comme le suggère ce rapport, de plus grands efforts sont nécessaires pour permettre au Canada d'espérer atteindre les objectifs de réduction des GES qu'il s'est fixés. La profondeur et la vitesse des transformations nécessaires pour y parvenir exigent une stratégie, une coordination et une efficacité qui est presque sans précédent au Canada. Néanmoins, comme nous l'avons démontré, cela n'est pas impossible. D'un point de vue purement technique et économique, cette transformation est abordable et réaliste. Cependant, **cela demandera, de la part des gouvernements, de l'industrie et des citoyens de penser et d'agir avec audace et ouverture, d'accepter le risque et l'échec, d'embrasser le changement et de réaliser que nous ne pouvons pas attendre d'avoir trouvé la solution parfaite avant de commencer à agir.**

En ce moment, l'on peut observer qu'il **y a une compréhension incomplète dans la population de ce à quoi ressemblerait réellement une économie canadienne carboneutre.** Pour remédier à cette situation et favoriser une meilleure compréhension, il faut que tous les acteurs politiques et économiques, de même que tous les citoyens du pays, **se penchent avec beaucoup plus d'attention sur cette question.**

C'est dans cette optique qu'une troisième partie de ces Perspectives sera publiée dans les mois à venir avec pour but, notamment, d'apporter des éléments permettant d'approfondir certaines de ces questions.