

HORIZON 2060

Perspectives énergétiques canadiennes

– 2021 –

Résumé



Modélisation



Soutien financier



Analyse et rédaction

Institut de l'énergie Trottier – Polytechnique Montréal

- Simon Langlois-Bertrand, Ph. D.
- Normand Mousseau, Ph. D.
- Louis Beaumier, M. Sc. A.

Pôle e3c – HEC Montréal

- Olivier Bahn, Ph. D.

Modélisation

ESMIA Consultants inc.

- Kathleen Vaillancourt, Ph. D.
- Marie Pied, M. Sc.

Traduction et révision linguistique

- Traducteurs associés
- Sabine Monnin
- Chantal Gaulin

Graphisme et mise en page

- Norman Terrault
- Morteza Asgari (Design des figures 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.

Nos remerciements également à Ressources naturelles Canada, pour leur contribution financière et leur précieuse collaboration tout au long du projet, et à Environnement et changements climatiques Canada, pour de nombreux échanges sur ce rapport.

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.

Référence à citer

Langlois-Bertrand, S., Vaillancourt, K., Beaumier, L., Pied, M., Bahn, O., Mousseau, N. (2021). *Perspectives énergétiques canadiennes 2021 – horizon 2060*, avec la contribution de Baggio, G., Joanis, M., Stringer, T. Institut de l'énergie Trottier et Pôle e3c

[En ligne] <http://iet.polymtl.ca/perspectives-energetiques/>.
(page consultée le jour/mois/année).

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 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.

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.

Version 20211007

Historique des révisions
20211006 Première version du Résumé
20211007 Correction au % de réduction de la production de pétrole en 2050, page 12



RÉSUMÉ

Ces Perspectives sont 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. Rédigé par des chercheurs indépendants, ce rapport présente tout d'abord un portrait à jour des secteurs canadiens de la production et de la consommation d'énergie. Il s'appuie ensuite 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.

Cet examen des scénarios à coût optimal, qui repose sur une modélisation technologique approfondie, prend en compte les émissions produites en dehors des sources liées à l'énergie, telles 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. Il permet en outre de comparer la façon dont certains défis semblables en matière de carboneutralité sont relevés dans différents endroits du monde, en identifiant les points communs et les caractéristiques distinctes de ces diverses approches.

Les résultats obtenus font ressortir les éléments suivants :

- i. La poursuite d'un objectif de carboneutralité change profondément la nature du défi consistant à transformer l'économie canadienne;
- ii. Les mesures actuellement mises en œuvre et annoncées publiquement, aux niveaux fédéral et provincial, sont 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. Cependant, 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.

Étant donné que l'évolution de la production et de la consommation d'énergie au Canada est ciblée par la plupart des politiques climatiques, ce résumé traitera surtout du lien existant entre les émissions de GES et le secteur de l'énergie, ce qui s'écarte de la structure plus traditionnelle du rapport principal.

Les caractéristiques particulières du système énergétique canadien

Le système énergétique canadien possède plusieurs caractéristiques uniques qui le distinguent sur la scène mondiale, et ce, malgré la taille relativement restreinte de la population et de l'économie du pays. Le Canada est l'un des plus grands producteurs et exportateurs d'énergie au monde et figure parmi les six principaux producteurs et exportateurs mondiaux de pétrole brut, d'uranium, d'électricité et de gaz naturel (Tableau R.1). Il se place également parmi les premiers pays en ce qui concerne la part de sa production d'électricité reposant sur des sources à faibles émissions de carbone, cette part étant de 80%. Il existe cependant de grandes différences entre les provinces pour chaque type de production d'énergie, de même qu'entre les divers secteurs en ce qui concerne le bouquet énergétique qui les alimente.

Compte tenu de la taille du pays, une part importante de la production canadienne est exportée, notamment sa production de pétrole et de gaz, ainsi que celle d'électricité et d'uranium. La majeure partie de ce commerce se fait avec les États-Unis, alors que les provinces, en raison d'infrastructures électriques et de relations politiques limitées, n'échangent entre elles que de faibles quantités d'énergie. Au cours des dernières années, les services publics canadiens à faibles émissions de carbone ont eu un grand intérêt pour les efforts visant à décarboner la production d'électricité aux États-Unis.

Dans son ensemble, le secteur de l'énergie contribue à raison de 10,2% au PIB du pays, mais à seulement 4,4% de ses emplois. Les exportations de pétrole et de gaz constituent la plus grande contribution du secteur de l'énergie au PIB, celles-ci ayant rapporté 122 milliards de dollars en 2019. Ces revenus d'exportation sont cependant sujets à des variations causées surtout par la vulnérabilité du secteur aux conditions changeantes du marché américain. Du fait de la valeur élevée des exportations dans le secteur du pétrole et du gaz, les investissements dans le secteur des énergies renouvelables ont eu un impact plus considérable sur la création d'emploi, même si la contribution de ce dernier au PIB est plus faible.

La réduction des GES et l'environnement politique

Le Canada, qui occupe le huitième rang mondial en termes de consommation globale d'énergie, consomme plus d'énergie par habitant que tout autre pays de l'OCDE, à l'exception de l'Islande. Cette consommation est également associée à une forte intensité énergétique dans l'ensemble de l'économie canadienne. Ici, une grande partie de la variation des niveaux de consommation par habitant entre les provinces s'explique par leurs profils industriels profondément différents et leurs orientations distinctes en matière de transport de marchandises, d'agriculture, de chauffage des locaux et de choix dans le domaine du transport.

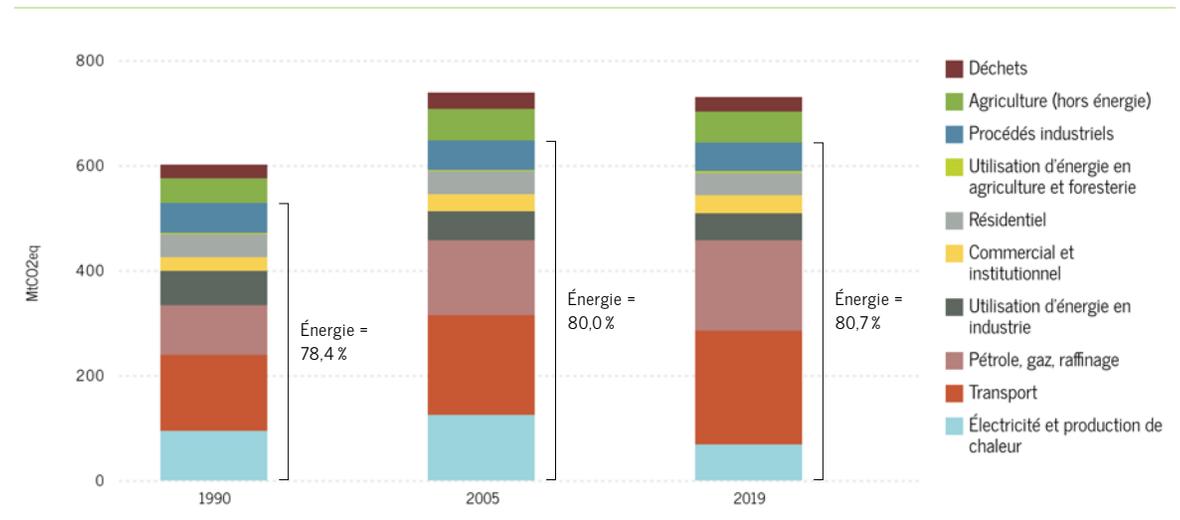
Il existe cependant un point commun entre les provinces en ce qui concerne la consommation d'énergie dans le secteur du transport. En effet, contrairement à presque tous les autres secteurs, cette consommation continue d'augmenter et s'est accrue de 12 % au cours de la dernière décennie, alors que l'augmentation de la demande de services de transport de passagers (+ 26 %) et de marchandises (+ 20 %) a surpassé les gains d'efficacité (Figure R.1). Pendant la même période, l'augmentation des dépenses énergétiques liées au transport a eu pour conséquence de voir les ménages à revenu élevé avoir une empreinte carbone nettement plus importante que les ménages à faible revenu pour lesquels ces dépenses accrues représentaient une charge plus considérable.

Comme les émissions de GES liées à l'énergie représentent 80 % de l'ensemble des émissions, ce profil de production et de consommation d'énergie est associé à une stagnation des émissions totales du Canada entre 2005 et 2019, celles-ci ayant connu une baisse de seulement 1,1 %. Le secteur du transport et l'industrie pétrolière et gazière, qui émettaient en 2019 respectivement 29,7 % et 23,6 % des émissions totales, sont responsables de la majorité des GES générés au pays. Ils ont également présenté, en termes absolus, les augmentations d'émissions les plus rapides entre 1990 et 2019.

Tableau R.1 – L'énergie au Canada : classement mondial pour les réserves/capacités, la production et les exportations (2019)

Ressource énergétique	Réserves/capacités prouvées	Production	Exportations
Pétrole brut	3	4	4
Uranium	3	2	4
Hydroélectricité	3	3	-
Électricité	8	6	3
Charbon	16	13	7
Gaz naturel	17	4	6

Figure R.1 – Les émissions de GES au Canada selon le secteur



RÉSUMÉ

Bien que le projet de carboneutralité annoncé par le gouvernement soit un nouvel objectif à atteindre, les provinces et le gouvernement fédéral ont adopté au cours des dernières années une multitude d'objectifs de réduction des émissions de GES. Les stratégies et plans d'action mis en œuvre n'ont cependant pas apporté les résultats escomptés, car les détails concernant la façon dont les objectifs seraient atteints, y compris les coûts, les technologies utilisées, les objectifs sectoriels et les trajectoires à suivre, faisaient souvent défaut. En conséquence, la plupart de ces stratégies n'ont pas réussi à se concrétiser jusqu'à maintenant.

Le fait que le Canada soit une fédération ajoute un degré de complexité aux efforts de réduction des émissions du pays, étant donné que les programmes dirigés par le gouvernement fédéral sont tributaires de mesures qui doivent être prises par des décideurs au niveau provincial. De profonds désaccords sur la tarification du carbone entre le gouvernement fédéral et certaines provinces ont abouti devant la Cour suprême, laquelle a confirmé en 2021 la constitutionnalité de la politique fédérale, ce qui a permis de dissiper une partie de l'incertitude entourant la gestion des efforts liés à la réduction des émissions de GES. Alors que cette décision est bienvenue, de nombreux autres domaines soulèvent encore d'importants défis de coordination en matière d'atténuation des émissions. Parmi ceux-ci, notons l'augmentation de la production d'électricité à faibles émissions de carbone, l'amélioration de la capacité du réseau électrique ainsi que la croissance du commerce interprovincial, des domaines qui revêtent une importance primordiale étant donné que la demande d'électricité devrait s'accroître de manière considérable si les émissions de GES étaient largement réduites dans l'ensemble de l'économie.

Il est à noter que la disponibilité des données sur la production et la consommation d'énergie, ainsi que les émissions de GES connexes, accuse toujours un retard au Canada, ce qui limite la capacité d'évaluer la transformation de ce secteur et l'effet qu'ont sur lui les changements technologiques, les investissements ainsi que les plans et mesures climatiques mis en œuvre.

Les scénarios menant à la carboneutralité

Tout au long de ces Perspectives, nous examinons trois scénarios de réduction des émissions de GES menant à la carboneutralité à des années différentes, un scénario de référence pour la situation de statu quo incluant les politiques déjà en vigueur, et un scénario de référence supplémentaire qui prend en compte l'impact du calendrier de tarification du carbone récemment annoncé jusqu'en 2030 (voir les descriptions dans le tableau E-2). Tous les scénarios sont analysés par l'entremise du modèle énergétique nord-américain TIMES (NATEM).

Tableau R.2 – Description du scénario de référence et des scénarios de réduction des émissions de GES utilisés dans la modélisation NATEM¹

Name	Description
REF	Le scénario de référence. Ce scénario présente des résultats qui n'utilisent aucun objectif contraignant de réduction des émissions de GES. Les hypothèses macroéconomiques (PIB, population, prix à l'exportation du pétrole et du gaz) sont conformes au scénario de référence utilisé dans le rapport Avenir énergétique du Canada en 2020 de la Régie de l'énergie du Canada (REC, 2020), lequel n'impose aucune contrainte supplémentaire en matière de réduction des émissions de GES, mais inclut les politiques qui sont déjà en vigueur.
TC30	Ce scénario utilise le scénario REF et lui ajoute le calendrier d'augmentation de la tarification du carbone annoncé par le gouvernement fédéral à la fin de 2020, lequel atteint un prix de 170 \$/t d'équivalent CO ₂ en 2030 ² . Pour accélérer l'impact de la tarification du carbone, ce scénario abaisse également le taux de rendement minimal par rapport à la pratique courante.
CN60	Ce scénario impose un objectif de carboneutralité pour l'ensemble de l'équivalent CO ₂ émis d'ici 2060, ainsi qu'une réduction des émissions par rapport à 2005 de l'ordre de 30% d'ici 2030 et de 80% d'ici 2050. C'est le reflet des objectifs canadiens antérieurs qui ont été bonifiés pour atteindre la carboneutralité en 2060.
CN50	Ce scénario impose un objectif de carboneutralité pour l'ensemble de l'équivalent CO ₂ émis d'ici 2050 ainsi qu'un objectif de 40% de réduction des émissions d'ici 2030 par rapport à 2005. C'est le scénario qui correspond le plus étroitement aux objectifs du gouvernement actuel.
CN45	Ce scénario impose un objectif de carboneutralité pour l'ensemble de l'équivalent CO ₂ émis d'ici 2045 ainsi qu'un objectif de 45% de réduction des émissions d'ici 2030 par rapport à 2005.

¹ Le modèle NATEM est un modèle d'optimisation des systèmes énergétiques mis en œuvre par ESMIA Consultants Inc. 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.

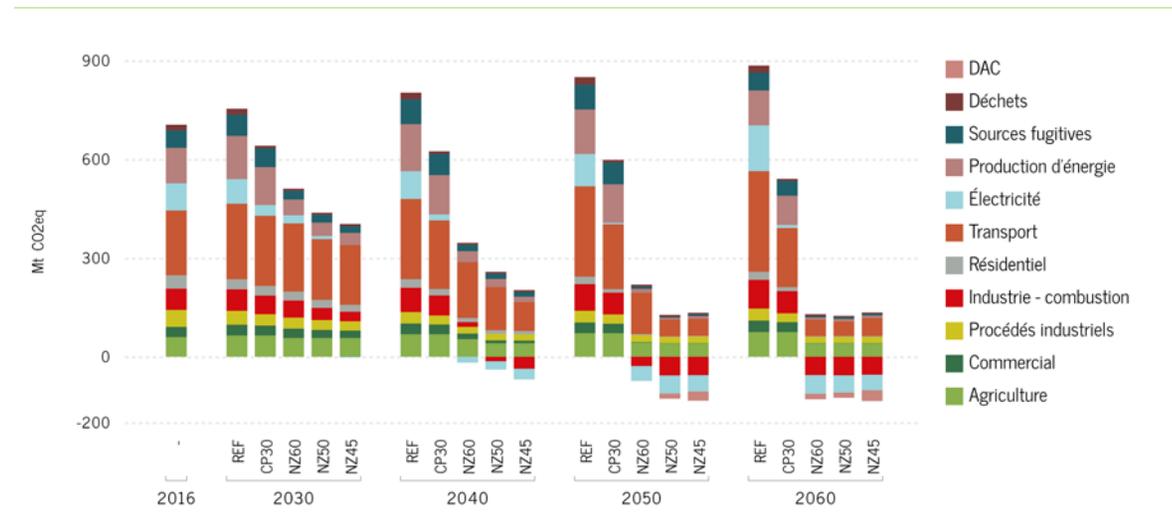
² Deux ajustements ont dû être apportés pour intégrer ce calendrier : premièrement, un taux d'actualisation a été utilisé pour transformer les tarifs proposés par le gouvernement dans le calendrier en leur équivalent pour l'année où ils sont en vigueur (par exemple, le tarif de 170 \$ annoncé cette année vaut, en dollars constants, 131 \$ en 2030 après indexation en fonction de l'inflation); deuxièmement, ce tarif maximum atteint en 2030 est ensuite indexé en fonction de l'inflation pour le reste de la période, c'est-à-dire jusqu'en 2060.

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 s'engagent dans une décarbonisation en profondeur**, et ce, en raison du fait que 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. De plus, une fois la carboneutralité atteinte, la majorité des émissions restantes ne seront pas liées à l'énergie, 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 le développement est difficile à prévoir.

Ces transformations nécessiteront un changement majeur des tendances historiques du secteur de l'énergie. Les politiques actuellement en vigueur, associées à la croissance économique et démographique historique (scénario REF), entraînent une augmentation anticipée des émissions de GES par rapport à 2016 de l'ordre de 7% d'ici 2030 et de 25% en 2060, celles-ci atteignant alors un total de 885 Mt d'équivalent CO₂ (Figure R.2). De son côté, le scénario TC30 conduit à une réduction de 9% des émissions d'ici 2030 par rapport à 2016, ce qui équivaut à une diminution de 13% par rapport à 2005, et conduit à une réduction de 23% des émissions d'ici 2060, laissant ainsi un volume d'émissions évalué à 541 Mt d'équivalent CO₂. Les scénarios menant à la carboneutralité (CN) imposent des transformations d'une beaucoup plus grande ampleur, et ce, même avant 2030 dans certains secteurs. Après 2030, le degré de réduction de la demande d'énergie au fil du temps par rapport au scénario REF constitue le principal facteur qui différencie les scénarios. Les scénarios CN sont ceux qui affichent les plus fortes baisses de la demande par rapport au point de départ de la période, ce qui s'explique en grande partie par les gains d'efficacité résultant de l'électrification, ainsi que par la baisse de la demande globale associée à la hausse des prix de l'énergie.

Figure R.2 – Les émissions totales de GES selon le secteur



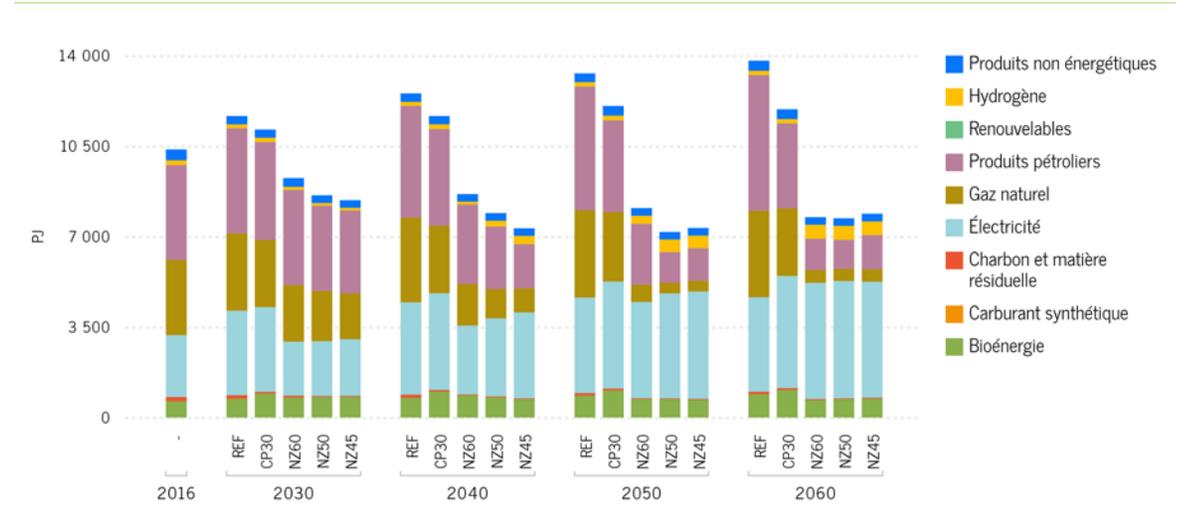
Dans tous les scénarios CN, les secteurs se décarbonent à des rythmes très différents. Les secteurs qui constituent les plus gros défis en matière de décarbonisation sont celui du transport, qui nécessitera une attention soutenue de la part des décideurs, ainsi que celui de l'industrie, car de nombreuses solutions reposent sur le développement d'infrastructures lourdes. D'autres secteurs, tels que ceux du bâtiment et de la combustion industrielle, semblent relativement faciles à décarboner et nécessiteront avant tout une réglementation forçant l'accélération de leur transformation.

La transformation des services énergétiques

Pour toutes les sources d'énergie, le scénario REF montre une évolution relativement uniforme de la demande correspondant à la croissance économique et démographique anticipée (Figure R.3). La prise en compte de l'impact de la taxe sur le carbone proposée jusqu'en 2030 (scénario TC30) entraîne une croissance relativement plus lente de la demande d'énergie que dans le scénario REF, avec une augmentation de la demande d'électricité et une stabilisation de la demande de pétrole et de gaz aux niveaux de 2016. Les contraintes directes imposées dans les scénarios CN60, CN50 et CN45 ont une incidence beaucoup plus importante sur la consommation d'énergie, alors que ces trois scénarios prévoient une réduction globale de la demande pour toutes les sources d'énergie entre 2016 et 2030. Après 2030, le degré de réduction de la demande d'énergie au fil du temps par rapport au scénario REF constitue le principal facteur qui différencie les scénarios. Ainsi, les scénarios menant à la carboneutralité affichent les plus fortes baisses de la demande, ce qui s'explique en grande partie par les gains d'efficacité résultant de l'électrification, ainsi que par la baisse de la demande globale associée à la hausse des prix de l'énergie.

La part des combustibles fossiles subit dans tous les scénarios CN 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 représentera respectivement 32 % et 16 % de ce qu'elle était en 2016. **Compte tenu du rythme rapide des transformations qui sont nécessaires, le gaz naturel ne pourra pas jouer le rôle d'énergie de transition.**

Figure R.3 – La consommation énergétique finale selon la source



Les obstacles financiers dans le secteur du bâtiment

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**; le scénario CN50 prévoit en effet une diminution des émissions par rapport à 2016 de l'ordre de 32 % en 2030 et de 97 % en 2050. 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. Par exemple, l'utilisation combinée de pompes à chaleur et de mesures d'efficacité énergétique pourrait permettre de remplacer le gaz naturel dans la plupart des provinces, ainsi que les produits pétroliers et la biomasse dans certaines autres.

Cependant, comme nous l'avons vu en examinant les résultats du scénario TC30, la tarification du carbone ne constitue pas, à elle seule, une mesure suffisante pour accélérer la transformation d'ici 2030; le scénario TC30 prévoit en effet en 2030 une diminution de 5 % des émissions par rapport au scénario REF, soit une diminution de 13 % par rapport à 2016. **La lenteur de la transformation peut s'expliquer en partie par les obstacles financiers que représentent les investissements initiaux qui sont nécessaires pour remplacer les combustibles fossiles par l'électricité, ainsi que par le manque de mesures incitatives mises en œuvre pour remédier à cette situation.**

En conséquence de cet état de fait, il est clair que l'adoption de mesures incitatives, tant politiques que réglementaires, pourrait rapidement assurer l'évolution permettant de quitter la situation de statu quo. Ces mesures pourraient même être conçues pour permettre l'atteinte d'objectifs plus ambitieux en matière de réduction des émissions que la trajectoire menant à la carboneutralité en 2050 (scénario CN50), notamment en encourageant l'adoption généralisée des pompes à chaleur électriques.

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 régulièrement au cours des 20 dernières années. Les tendances et mesures actuelles (scénario REF) prévoient par rapport à 2016 une croissance de la demande d'énergie pour les transports de l'ordre de 23 % d'ici 2030 et de 73 % d'ici 2060 (Figure R.4), avec une augmentation légèrement plus lente des émissions de GES (respectivement de 16 % et de 55 %) en raison de l'électrification accrue des véhicules de tourisme. Bien que le scénario TC30 ne soit pas suffisant pour stopper la croissance de la demande énergétique de ce secteur, il parvient à stabiliser les émissions au niveau de 2016 en 2050 et à les réduire de 9 % en 2060.

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, ce qui fait que le secteur du transport sera le plus difficile à décarboner.

À terme, **les scénarios CN montrent une réduction de plus de 80 % de la consommation d'essence et de diesel.** Les biocarburants apportent une contribution à court terme mais sont rapidement remplacés par l'électricité dans les véhicules personnels et les transports routiers commerciaux de petite taille. Leur rôle est réservé aux domaines où les technologies électriques sont peu performantes, comme le transport maritime et hors route. Cette évolution prend cependant du temps. Bien que l'électricité joue un rôle très important dans le remplacement de la consommation d'essence et de diesel d'ici 2050, en particulier dans les véhicules personnels et le transport routier commercial (qui représentent respectivement 80 % et 44 % du total), et surtout dans les véhicules de petite et moyenne taille, les émissions du secteur du transport ne diminuent que de 6 % dans le scénario CN50 en 2030 et ont subi en 2050 une réduction de 74 % par rapport aux émissions de 2016.

En dehors des véhicules routiers de petite et moyenne taille, **d'autres domaines du transport sont beaucoup plus difficiles à décarboner**, en raison de coûts afférents plus élevés et de la difficulté de remplacer dans certaines utilisations les sources énergétiques traditionnelles par des technologies à faibles émissions de carbone. Le transport commercial lourd ne montre ainsi qu'une lente transformation. De nombreuses options à plus long terme se retrouvent en concurrence, notamment les véhicules électriques, les lignes caténares, l'hydrogène et les biocarburants. Compte tenu des infrastructures nécessaires à la prise en charge de chaque technologie, il faudra, pour accélérer cette transformation, concentrer rapidement les efforts sur un sous-ensemble de ces technologies.

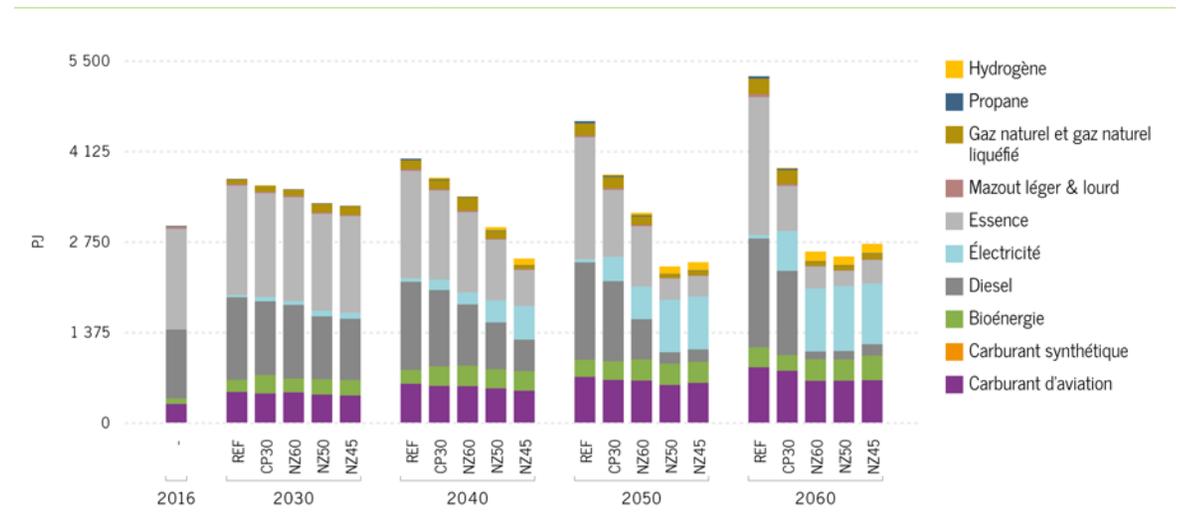
Les combinaisons de stratégies dans le secteur industriel

Le secteur industriel s'appuie sur un bouquet énergétique diversifié, les biocarburants et l'électricité comblant 55 % de ses besoins énergétiques. Ce pourcentage devrait demeurer stable au cours de la prochaine décennie dans le scénario REF qui prévoit que la consommation totale d'énergie augmentera de 31 % entre 2016 et 2030. Comme l'industrie est sensible aux variations des tarifs, l'introduction d'un prix du carbone plus élevé (scénario TC30) sera suffisante pour faire augmenter ce pourcentage à 60 % d'ici 2030 et le maintenir à ce niveau par la suite, tout en conservant une croissance similaire en ce qui a trait à la consommation totale d'énergie.

Dans le scénario CN50, le secteur industriel réduit ses émissions de 42 % en 2030 et devient net négatif en 2050, ce qui représente une réduction de 134 % de ses émissions par rapport à 2016. Cette réduction sera obtenue grâce à la transformation des procédés industriels et à l'utilisation de sources d'énergie à faibles émissions de carbone pour la production de chaleur.

Les résultats de la modélisation montrent que la décarbonisation de l'industrie nécessitera l'utilisation d'une combinaison de stratégies faisant entre autres appel au captage du carbone. Ces stratégies comprennent l'innovation technologique, le changement de combustible, le changement de produit, le captage des émissions ainsi que la production d'une part importante de l'énergie à partir de la biomasse associée au captage et au stockage du carbone (BECSC).

Figure R.4 – La consommation d'énergie finale du secteur du transport



Cependant, si le captage du carbone permet une réduction importante des émissions, cette technique ne peut pas être utilisée à petite échelle pour capter les émissions de petites unités émettrices et celles de tous les procédés industriels. Les émissions produites par les procédés industriels sont donc difficiles à décarboner, à moins d'innovations technologiques majeures ou d'une modification de la demande.

Même si ces transformations nécessiteront la réduction de certaines productions, **l'innovation est essentielle pour soutenir ce secteur, soit en améliorant la technologie et les procédés utilisés, soit en permettant une meilleure intégration des systèmes de production et de consommation de la chaleur.** La conception de stratégies et de politiques efficaces permettant au secteur industriel d'atteindre la carboneutralité (en dehors de la production d'énergie) s'appuiera sur les divers défis que devront relever de nombreux sous-secteurs, dont la taille et les besoins seront variés, et les points communs de ces défis qui iront au-delà des objectifs traditionnels d'efficacité énergétique.

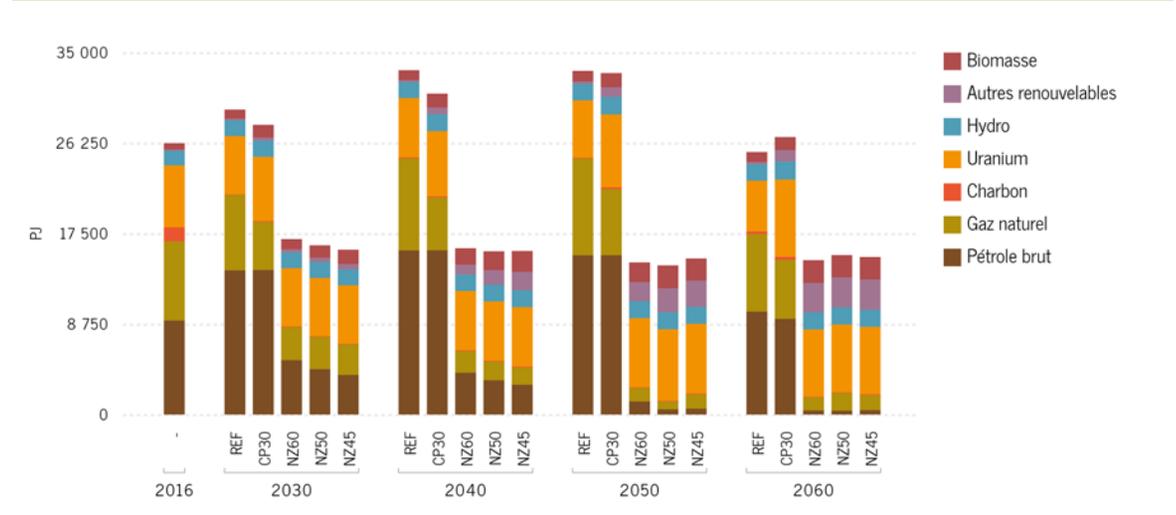
L'agriculture sera responsable d'une plus grande part des émissions

Même si l'agriculture est en mesure de décarboner sa consommation d'énergie et de réduire ses émissions globales de GES de 31% tout au plus dans tous les scénarios CN, les émissions non énergétiques de ce secteur demeurent importantes. **Avec un volume d'émissions de 42 Mt d'équivalent CO₂, l'agriculture est responsable du tiers des émissions restantes d'ici 2050.** À moins de transformer complètement les méthodes et les volumes de production, ces émissions ne pourront être ni évitées ni captées sur site. C'est un domaine dans lequel il faudrait mener des recherches approfondies afin de déterminer dans quelle mesure l'amélioration de la gestion de l'utilisation des terres, le changement des habitudes alimentaires et l'adoption de méthodes de production alternatives pourraient permettre une réduction des émissions de GES. Si ces mesures ne permettent pas d'atteindre les résultats escomptés, **ces émissions doivent être compensées par des mesures d'extraction directe dans l'air ou des activités qui produisent des émissions négatives.**

La production énergétique du Canada dans une économie carboneutre

En suivant les tendances actuelles, la production énergétique du Canada (Figure R.5) devrait continuer à croître jusqu'en 2040. Elle sera dominée par la production pétrolière, qui connaîtra une augmentation par rapport à 2016 de l'ordre de 54% en 2030 et de 75% en 2040, avant de revenir en 2060 aux niveaux de 2016 en raison d'une baisse des exportations. La production de gaz naturel connaîtra une croissance lente jusqu'en 2050, où son volume se sera accru de 22%, avant de revenir, elle aussi, à ses niveaux de 2016 en 2060. Au cours de la prochaine décennie, l'augmentation du prix du carbone (scénario TC30) a relativement peu d'effet sur la production de pétrole, laquelle est en grande partie exportée ou utilisée dans les transports, là où il n'existe que peu de technologies alternatives à bon marché. Dans le scénario TC30 cependant, la production de gaz naturel devrait chuter de 40% d'ici 2030, avant de constituer à nouveau une part plus importante du bouquet énergétique, car ce scénario plafonne le prix du carbone au tarif en vigueur en 2030.

Figure R.5 – La production d'énergie primaire



Tous les scénarios CN suivent une tendance très différente et prévoient une forte diminution de la production de pétrole et de gaz. Dans le scénario CN50, la production de pétrole connaît une réduction de 50% en 2030 et de 94% en 2050, tandis que celle de gaz diminue respectivement de 59% et 90%. Au cours des mêmes périodes, les diverses productions renouvelables sont multipliées par 4 en 2030 et par 20 en 2050, alors que, pour la production de biomasse, ce facteur est de 2 en 2030 et de 4 en 2050.

Un secteur de l'électricité net négatif

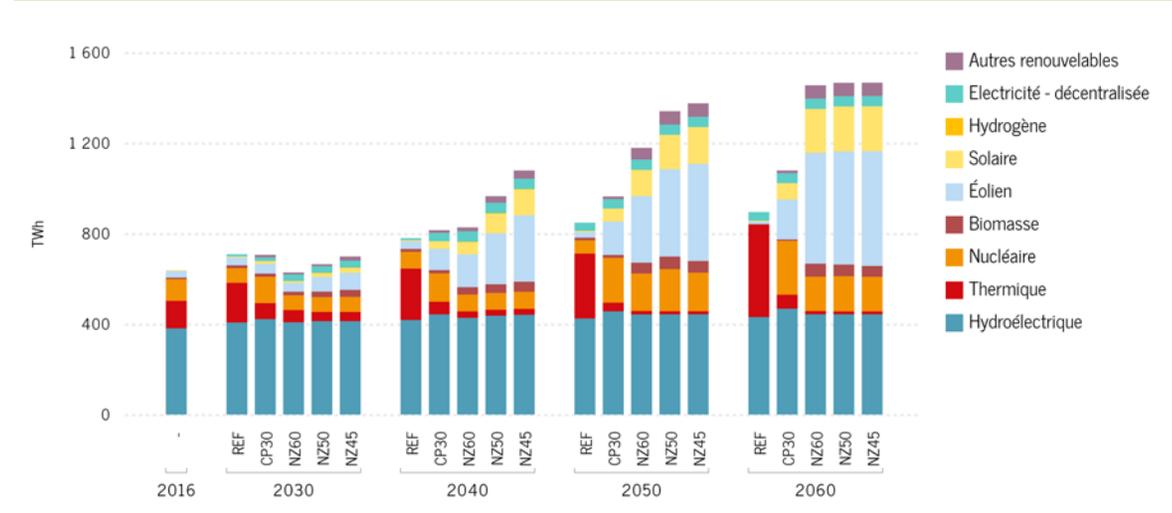
Avec la diminution des coûts liés aux technologies électriques ainsi qu'à la production et au stockage de l'électricité, le secteur de l'électricité devrait connaître une expansion dans tous les scénarios envisagés (Figure R.6). Dans le scénario REF, la part de l'électricité dans le bouquet énergétique passe de 23 % à 25 % en 2030 et se maintient par la suite à ce niveau jusqu'en 2060. Dans le scénario TC30, cette part connaît une évolution plus rapide qui l'amène à représenter 26 % du bouquet énergétique en 2030 et en 2050. Sans surprise, l'électrification est encore plus importante dans les scénarios CN. Par exemple, dans le scénario CN50, l'électricité représente 27 % de l'ensemble de l'énergie consommée en 2030, ce pourcentage s'accroissant à 57 % en 2050 avant d'atteindre 59 % en 2060.

Dans tous les scénarios CN, cette consommation est satisfaite par une expansion spectaculaire de la production d'électricité à faibles émissions de carbone, dont la majeure partie proviendra de technologies variables nécessitant que l'on accorde une attention particulière à la résilience du réseau électrique. Le stockage en dehors des réservoirs hydroélectriques, notamment à moyen terme (sur des semaines) et à long terme (sur des mois), est un facteur qui pourrait cependant avoir une forte incidence sur cette expansion.

Les grandes installations hydroélectriques du Canada ont un rôle important à jouer pour soutenir l'adaptation du pays à la croissance de la capacité de production électrique provenant des énergies éolienne et solaire intermittentes, laquelle devrait plus que tripler dans les scénarios CN. Ces installations permettront ainsi de réduire le besoin de créer de nouvelles capacités de stockage ainsi que le coût global de ces technologies. Cependant, en l'absence d'évaluations détaillées de nouveaux projets hydroélectriques et de leurs coûts potentiels, et compte tenu de leur faible acceptabilité sociale, aucun nouveau projet de ce genre n'est prévu, et ce, même si le Canada dispose encore de possibilités considérables de développement de cette source d'énergie.

Étant donné l'importance des énergies solaire et éolienne dans les scénarios CN, et compte tenu des contraintes techniques actuelles affectant d'autres technologies de stockage, l'hydrogène et l'énergie nucléaire pourraient être amenés à jouer un rôle important dans ce domaine. **Les PRM pourraient notamment être développés et sou-**

Figure R.6 – La production d'électricité



tenir l'expansion des activités d'extraction d'uranium pour assurer leur approvisionnement, alors que le potentiel technique de l'hydrogène pourrait s'avérer intéressant dans les cas où un stockage à long terme serait nécessaire. Il est cependant difficile actuellement de préciser quelle sera la contribution respective de ces deux technologies, et ce, en raison des nombreuses inconnues qui demeurent à leur sujet en matière de coûts, de spécifications techniques, d'infrastructures requises, de préoccupations de sécurité et d'acceptabilité sociale. Il est probable que leur rôle dépendra davantage de choix politiques plutôt que de simples considérations économiques.

Les scénarios CN prévoient une élimination rapide et presque complète du charbon et du gaz naturel. Une quantité relativement faible d'électricité sera produite à partir de la biomasse associée au captage du carbone (BECCS), une production à émissions négatives qui profitera du fait que la biomasse capte naturellement des GES qui sont récupérés lorsque la biomasse est brûlée pour alimenter les turbines. En conséquence, les émissions de GES du secteur de l'électricité deviendront nettes négatives, ce qui aidera à compenser une partie des émissions restantes dans les autres secteurs une fois que la carboneutralité aura été atteinte.

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, de l'ordre de 62 % dans le scénario CN50, et ce, même avant 2030 afin que les émissions provenant de cette production demeurent compatibles avec les objectifs de carboneutralité à plus long terme. 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 avant 2030.**

Le défi consistant à conserver une production de combustibles fossiles dans une trajectoire menant à la carboneutralité est illustré par des scénarios de sensibilité qui imposent des niveaux plus élevés de production de pétrole et de gaz. Ceux-ci montrent que pour maintenir en 2030 des niveaux de production de pétrole et de gaz équivalant respectivement à 84 % et 52 % des niveaux de 2016, il est nécessaire que la production d'électricité devienne nette négative au cours de la prochaine décennie et que la décarbonisation des secteurs industriel, du bâtiment et du transport soit considérablement accélérée par rapport aux transformations déjà rapides qui sont requises dans les scénarios CN. Par conséquent, **afin de permettre une plus grande production de combustibles fossiles destinée à l'exportation en 2030, la consommation nationale devrait, en 2050, être inférieure de plus de 10 % aux prévisions du scénario CN50.**

Le fait de conserver une production de pétrole et de gaz sans CSC direct induit des coûts (directs) plus élevés que dans le scénario CN50; en effet, les efforts de réduction des émissions de GES sont alors transférés du secteur de la production de pétrole et de gaz à d'autres secteurs de l'économie, y compris d'autres industries et les secteurs du bâtiment et du transport; en outre, ils reposent davantage sur la technologie d'extraction directe dans l'air pour compenser le volume plus élevé d'émissions résultant des activités économiques.

Un rôle évolutif pour la bioénergie

Dans tous les scénarios, la bioénergie devrait rapidement jouer un rôle accru, en particulier dans le secteur du transport. 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 cependant pas le même dans tous les scénarios. En effet, la combinaison de sources de biomasse utilisée change considérablement au fil du temps, les résidus agricoles accroissant leur part au détriment de celle des résidus forestiers; d'autre part, les utilisations principales de la bioénergie évoluent, alors que la production de biocarburants et d'électricité associée au captage du carbone consomme une quantité accrue de cette ressource.

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, tandis que d'autres conserveront une fraction globale plus élevée de leurs émissions.** 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.

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 permettent le déploiement des efforts qui sont 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.

Adopter une approche globale en matière d'émissions de GES

La différence entre une réduction importante des émissions et la carboneutralité

Dans l'ensemble, les scénarios CN prévoient un volume important d'émissions restantes, tous secteurs confondus, de l'ordre de 155 à 167 Mt d'équivalent CO₂ par année. Ces résultats soulignent le rôle compensatoire essentiel des technologies de captage et de stockage du carbone (CSC) dont, entre autres, l'extraction directe dans l'air (EDA). **Par rapport à des scénarios basés sur une simple réduction des émissions, l'atteinte de la carboneutralité impose une contrainte qui modifie profondément l'évolution de la consommation d'énergie.** Cette observation permet également de mettre en évidence l'une des principales différences existant entre les deux scénarios de référence (les scénarios REF et TC30) et les scénarios CN, soit le fait que les premiers recourent très peu au captage des émissions.

En effet, même en réalisant d'importantes réductions là où la technologie le permet, il restera un volume important d'émissions qui ne pourront être évitées, réduites ou captées à l'aide des moyens actuellement disponibles. Il s'agit en premier lieu des émissions non énergétiques provenant de l'agriculture et des déchets, ainsi que de la plupart des émissions libérées par les procédés industriels. Cependant, même dans la vaste catégorie des émissions liées à l'énergie, qui représentent aujourd'hui plus de 80 % des émissions du Canada, certains secteurs sont difficiles à décarboner complètement; c'est le cas du secteur du transport qui, dans les scénarios CN, est responsable de 40 % des émissions restantes en 2050.

Réserver le 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.

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 que les projections de ces scénarios pèchent peut-être par excès d'optimisme. Si c'était le cas, il pourrait s'avérer nécessaire 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. Cette préoccupation s'ajoute aux risques et aux inconnues actuelles concernant le stockage continu de carbone à grande échelle, et ce, d'autant plus que le monde ne s'arrête de tourner pas une fois que l'on a atteint la carboneutralité. En effet, les volumes d'émissions de GES qu'il sera nécessaire de stocker afin d'atteindre la carboneutralité en 2050 devront par la suite être captés chaque année. **Si certaines améliorations technologiques sont susceptibles d'atténuer une partie de ces risques au fil du temps, 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.**

Les principales incertitudes concernant les trajectoires technologiques importantes

Ces Perspectives analysent les principales trajectoires technologiques qui subissent surtout la contrainte des objectifs de réduction des émissions. De par la nature même de l'exercice, **ces trajectoires sont basées sur un grand nombre d'hypothèses qui sont documentées concernant l'évolution des technologies et les coûts qui lui sont associés.** Au cours des dernières années cependant, bon nombre des certitudes récentes sur les émissions de GES, y compris le rôle des solutions fondées sur la nature, ont fait l'objet de profondes réévaluations. De même, les développements techniques se sont souvent avérés imprévisibles : certaines technologies prometteuses se sont révélées inadaptées pour une utilisation à grande échelle, tandis que de nouvelles approches inattendues ont transformé des secteurs économiques entiers.

En raison de ces incertitudes, ces Perspectives examinent également la façon dont certaines transitions pourraient se dérouler si les choses évoluaient différemment de ce que prévoient les hypothèses énoncées. Au-delà de la production de pétrole et de gaz, qui a été abordée précédemment, nous présentons ici des analyses de sensibilité concernant trois trajectoires, soit l'électrification, la bioénergie et l'hydrogène.

L'intégration de l'électricité renouvelable variable

Dans les scénarios CN étudiés dans le cadre de ces Perspectives, **l'électricité renouvelable variable, fournie par la production éolienne et solaire, constitue la quasi-totalité de l'augmentation** très significative de la production d'électricité qui est nécessaire pour répondre à la demande. Comme l'alimentation en électricité présente une forte dépendance à l'égard des sources d'énergie variables, il devient nécessaire d'augmenter considérablement les capacités de production et de stockage pour compenser les facteurs de capacité plus faibles de ces technologies ainsi que les déséquilibres existant entre les niveaux de production et ceux de consommation.

Selon les hypothèses, le fait d'imposer des contraintes sur le stockage et la production d'électricité variable peut, dans une perspective d'allocation optimale des coûts, favoriser la production nucléaire ou hydroélectrique associée à un renforcement des connexions interprovinciales. Cette dernière option permet de réduire le besoin de produire une grande quantité d'électricité et de posséder une importante capacité installée pour équilibrer l'apport des énergies renouvelables variables. Cela crée des profils sectoriels différents dans lesquels la consommation d'hydrogène et de gaz naturel augmente également. Toutes ces trajectoires, que ce soit la production à grande échelle d'électricité variable avec stockage, l'utilisation des petits réacteurs nucléaires modulaires (PRM) ou l'accroissement de la production d'hydroélectricité associée à une augmentation des échanges interprovinciaux d'électricité, s'accompagnent de leurs problèmes particuliers d'acceptabilité sociale et politique. Leur utilisation est en outre marquée d'incertitudes techniques et économiques, notamment en ce qui concerne les PRM nucléaires, le stockage à grande échelle dans des batteries et les coûts annexes des réseaux électriques qui incorporent des niveaux importants de production d'énergie variable.

Si le choix d'une trajectoire est déterminé par une combinaison d'orientations politiques, de développements technologiques et soumis au seul destin, l'augmentation spectaculaire de la demande totale d'électricité à faibles émissions de carbone, nécessaire à la viabilité de toute société carboneutre, devra être satisfaite d'une manière ou d'une autre, et la planification ainsi que les investissements consentis dans ce sens devront commencer très bientôt.

Les contraintes relatives à la bioénergie

Les estimations concernant les quantités de biomasse disponible ont une grande incidence sur le système énergétique, y compris sur le secteur du transport et la production d'électricité et d'hydrogène dans les scénarios CN, car la production d'électricité à partir de la biomasse, associée au captage et au stockage du carbone (BECSC), fournit une solution relativement bon marché pour produire des émissions négatives.

Dans une analyse de sensibilité dans laquelle une plus grande quantité de biomasse est disponible par rapport aux estimations actuelles, ce facteur a conduit à une plus grande utilisation de la BECSC, ce qui a réduit la pression pour l'utilisation de l'EDA lorsque l'on se rapproche de la carboneutralité. L'inverse est vrai dans un avenir où la quantité de biomasse disponible est plus restreinte, ce qui souligne la nécessité de gérer cette ressource avec prudence. Dans le secteur du transport, l'augmentation de la disponibilité de la biomasse n'a pas un impact uniforme sur tous les sous-secteurs : le transport de passager est principalement affecté à plus long terme, les transports ferroviaires, maritimes et tout-terrain ne le sont qu'à court terme, tandis que le transport de marchandises est affecté en tout temps.

Indépendamment de ces 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.

La trajectoire incertaine de l'hydrogène

Dans les scénarios CN, la modélisation prévoit que l'hydrogène ne constituera qu'une faible part de l'ensemble des énergies utilisées, et ce même en 2060, un fait qui s'explique en partie par la difficulté que l'on a actuellement à évaluer les différents rôles techniques qu'il pourrait jouer. Cependant, une analyse de sensibilité imposant des niveaux minimums de consommation d'hydrogène montre que son utilisation pourrait s'accroître dans la plupart des domaines des transports ainsi que dans certains secteurs industriels.

Du point de vue des émissions de GES, le coût de l'électrolyse et la disponibilité de la biomasse aux fins de la production de BECSC constitueront deux facteurs déterminants dans le profil d'émissions de l'utilisation de l'hydrogène, si toutefois la consommation de ce combustible atteint des niveaux plus élevés que ne le suggèrent les résultats du scénario CN50.

L'examen d'hypothèses modifiées concernant le développement de l'utilisation de l'hydrogène illustre bien le fait que de nombreuses trajectoires technologiques ne peuvent pas exister de manière isolée. En effet, la disponibilité de la biomasse accroît non seulement la capacité de réaliser des réductions d'émissions à court terme lorsque le coût des solutions technologiques demeure élevé, mais elle permet aussi de produire une plus grande quantité d'hydrogène avec des émissions négatives, ce qui entraîne une augmentation de la consommation globale de ce combustible. La production d'une plus grande quantité d'hydrogène permet de décarboner certaines utilisations peu propices à l'électrification et pourrait constituer une alternative en matière de stockage. L'importance des enjeux d'acceptabilité sociale liés aux installations nucléaires et à la construction de grands barrages hydroélectriques supplémentaires peut également avoir une incidence sur les possibilités d'augmentation de l'utilisation de la biomasse. Résoudre ces incertitudes prendra du temps et nécessitera peut-être de faire des choix stratégiques concernant la ou les trajectoires sur lesquelles il faudra se concentrer, et ce, avant que ces incertitudes ne soient complètement éliminées.

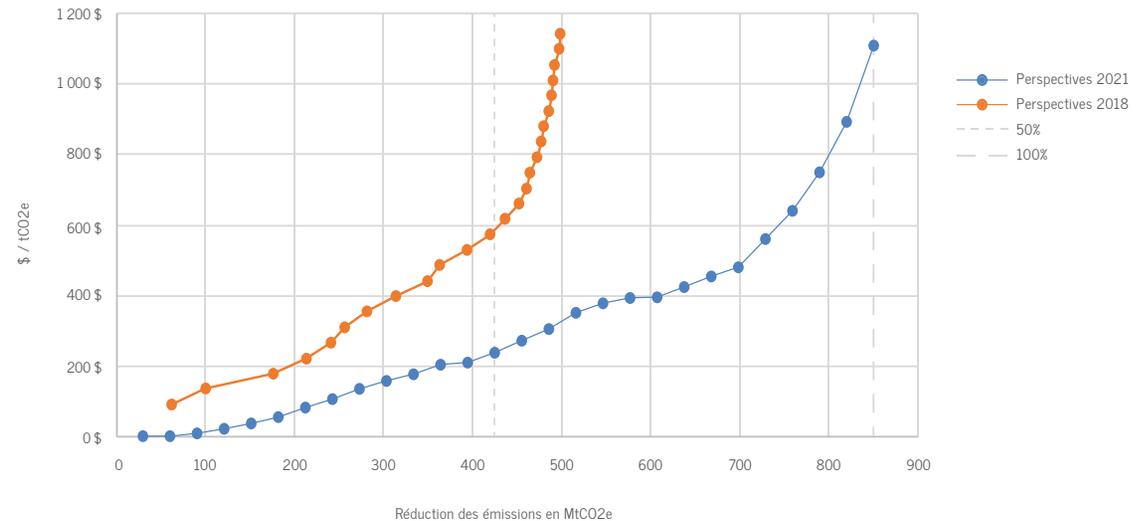
Le coût décroissant des trajectoires menant à la carboneutralité

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.

Pour évaluer le coût net de l'électrification de l'approvisionnement en énergie primaire, on effectue une comparaison entre, d'une part, les investissements nécessaires pour assurer la production, le transport et le stockage de l'électricité à faibles émissions de carbone et, d'autre part, les économies résultant de la réduction de la consommation de combustibles fossiles. Cette évaluation montre que les scénarios REF et TC30 ne devraient pas générer d'économies annuelles au cours des prochaines décennies. Cependant, les trois scénarios CN suggèrent qu'il serait possible de réaliser des économies annuelles considérables à partir de 2050. **Même en doublant le coût projeté des infrastructures de transport d'électricité, tout en réduisant de moitié le coût des combustibles par rapport aux principales hypothèses, les scénarios CN permettent encore des économies annuelles de 23 milliards de dollars canadiens.**

Dans l'ensemble, le coût anticipé de la décarbonisation de l'économie canadienne diminue rapidement, car le développement technologique s'effectue plus vite que prévu. **Les Perspectives énergétiques canadiennes 2018 prévoyaient ainsi que la décarbonisation de 65% de l'économie canadienne d'ici 2050 engendrerait un coût marginal de la dernière tonne supérieur à 1 000 \$; or, les projections actuelles évaluent que le coût marginal de la décarbonisation d'ici 2050 de 80% à 100% de l'économie canadienne s'élèverait respectivement à 400 \$ et 1 100 \$ (Figure R.7).** Même s'il n'est pas possible de faire une comparaison précise de ces données, puisque le modèle actuel comprend une couverture plus complète des émissions et que l'évolution du scénario de référence est différente, l'ordre de grandeur est cependant indéniable. Depuis les

Figure R.7 – L'évolution des coûts marginaux de la réduction des émissions de GES



Notes : 1. Les coûts mentionnés pour les Perspectives 2021 sont les coûts prévus dans le scénario CN50
2. Le scénario des Perspectives 2018 prévoyait une réduction de 80% des émissions liées à l'énergie

précédentes Perspectives, les technologies ont connu une évolution qui leur a permis non seulement d'apporter des solutions pour réduire les émissions, mais également de diminuer les incertitudes concernant les voies technologiques et leurs coûts, ce qui a entraîné en moins de trois ans une réduction très significative des coûts marginaux. C'est ainsi que la réduction de 80% des émissions est atteinte avant 2050 dans le scénario CN50 par rapport au scénario 80P des précédentes Perspectives. En conséquence, les coûts marginaux à plus long terme sont donc réduits; mais, plus important encore, **les coûts plus élevés estimés pour la réduction de la dernière tonne perdent de leur pertinence, car ils affectent une proportion plus restreinte des réductions.**

Les limites des actions et des choix individuels

Une conclusion générale de la modélisation veut que, **pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de GES d'ici 2030, il sera avant tout nécessaire de transformer les secteurs industriel et commercial plutôt que les actions des citoyens**; ces transformations comprendront la décarbonisation des procédés industriels, une diminution significative de la production de pétrole et de gaz et une réduction énergétique des émissions fugitives.

Si l'on prend en considération les horizons 2050 et 2060, le rôle des actions quotidiennes des citoyens dans l'atteinte des objectifs de carboneutralité 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 (6%) et le transport personnel, y compris les véhicules individuels (11%) et les avions (1%). 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, plus généralement, sur les secteurs énergétique et privé.

Situer ces Perspectives parmi d'autres travaux de modélisation de la carboneutralité qui sont réalisés ailleurs dans le monde

Au cours des dernières années, plusieurs rapports détaillés s'intéressant à la carboneutralité ont été produits pour un certain nombre de régions et de pays. Des domaines généraux de consensus se dégagent en effectuant une comparaison entre ces documents et les présentes Perspectives. Parmi ceux-ci notons les points suivants : pour atteindre la carboneutralité, il est notamment nécessaire de procéder à une électrification généralisée, ce qui requiert des investissements dans la résilience et l'expansion du réseau électrique; les technologies à émissions négatives ne devraient être utilisées que pour compenser les émissions des secteurs les plus difficiles à décarboner (c'est-à-dire ceux dans lesquels il n'est pas possible de prévoir le développement d'une technologie sans carbone); le secteur du transport est particulièrement difficile à décarboner et nécessite que l'on définisse au plus vite des orientations stratégiques pour soutenir le développement d'infrastructures spécifiques; la production de pétrole et de gaz doit aller en déclinant; enfin, la décarbonisation de l'industrie représente un défi qui nécessitera des efforts de recherche et de développement considérables. De plus, même si les gouvernements ne seront pas tenus de choisir chacune des technologies spécifiques à privilégier, ils devront néanmoins prendre des décisions précoces concernant les infrastructures dont il faudra soutenir le développement, tout en conservant une certaine flexibilité pour tenir compte des innovations futures.

La comparaison avec ces divers rapports suggère également que le Canada, qui possède une production d'électricité déjà largement décarbonée, une forte production pétrolière et gazière ainsi qu'une base industrielle diversifiée, devra transformer son économie plus rapidement que la plupart des autres pays de l'OCDE s'il veut atteindre ses objectifs climatiques.

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

Les résultats du scénario TC30 montrent que **les règlements, les programmes et les contraintes qui s'appliquent actuellement aux émissions doivent être considérablement élargis ou améliorés pour permettre au Canada d'atteindre ses objectifs de 2030 et 2050**. On constate en effet que l'évolution proposée du prix fédéral du carbone jusqu'en 2030, avec les plans de dépenses publiques et les mesures actuelles en vigueur, est insuffisante pour atteindre la réduction des émissions visée, à 13 % de moins que leur niveau de 2005. **Bien que la Norme sur les combustibles propres ne soit pas incluse dans la modélisation, ces mesures ne devraient entraîner qu'une réduction additionnelle de 3%**¹, pour une réduction totale nettement inférieure à l'objectif fédéral de réduction de 40 à 45 % des émissions. L'augmentation de la tarification du carbone dans le scénario TC30 n'a pas d'impact majeur en dehors de l'industrie et de la production d'énergie et d'électricité; elle n'est donc pas suffisante pour entraîner des réductions d'émissions de cet ordre.

De plus, les scénarios REF et TC30 sont tous les deux très loin de la carboneutralité en 2050 et 2060, ce qui illustre bien à quel point les politiques en vigueur ou annoncées sont loin d'être suffisantes pour mener la société à la carboneutralité. **Il est essentiel que de plus amples détails soient communiqués sur la façon dont les plans fédéral et provinciaux transformeront certains secteurs spécifiques; ces détails doivent comprendre des informations qui ne sont pas accessibles au public en ce moment pour permettre une meilleure évaluation indépendante de l'impact de ces plans sur le système énergétique du Canada et le volume d'émissions projeté.**

Ce constat souligne le fait que, pour corriger le cours des choses, 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. C'est le cas, par exemple, du secteur du bâtiment, où le rôle des pompes à chaleur dans les logements résidentiels et celui des systèmes électriques dans les espaces commerciaux sont similaires dans tous les scénarios et permettent de remplacer le gaz naturel. Il semble donc judicieux d'encourager l'adoption rapide de ces technologies à coût raisonnable et à faibles risques. Ce constat est également pertinent en ce qui concerne la décarbonisation de la consommation d'énergie dans le secteur agricole.

En conséquence, la hausse du prix du carbone doit rapidement s'accompagner d'une planification visant à décarboner la production d'électricité, à étendre le réseau et à lever les autres obstacles freinant la transformation de ces secteurs.

¹ ECCC. 2019. Clean Fuel Standard: Cost-Benefit Analysis Framework. Environment and Climate Change Canada.

Les conclusions tirées de ces Perspectives

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

Viser la carboneutralité change tout

1. **Les politiques et les mesures doivent être mises en œuvre ou repensées en fonction de l'objectif de 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. **Atteindre la carboneutralité implique de privilégier la réduction des émissions plutôt que la compensation de celles-ci par des activités de captage du carbone.** Compte tenu des incertitudes entourant cette technologie, il est aujourd'hui plus rentable et stratégiquement structurant de n'utiliser les solutions de captage et de stockage du carbone que pour compenser les émissions quasi impossibles à éviter, comme celles provenant de l'agriculture et de certains procédés industriels.
3. **Alors que la productivité et l'efficacité énergétique sont des facteurs importants qui contribuent à la transformation du système énergétique, ils peuvent, dans certains cas, se révéler incompatibles avec la poursuite de l'objectif de la carboneutralité.** L'élimination des émissions de GES peut en effet diminuer la productivité énergétique; c'est par exemple le cas de l'utilisation de l'hydrogène produit par électrolyse ou à partir de la biomasse en remplacement du gaz naturel pour la production de chaleur, ou de celui du stockage utilisé pour réduire la demande de pointe d'électricité.
4. **Une fois la carboneutralité atteinte, le système énergétique continuera d'évoluer au rythme des changements affectant les coûts relatifs et les technologies disponibles.** Les solutions qui, sans être optimales, soutiennent la carboneutralité seront probablement améliorées à l'avenir. Il n'est pas nécessaire d'atteindre immédiatement la perfection tant que la compatibilité avec la carboneutralité est prise en compte.

Un besoin essentiel pour des approches plus efficaces

5. **Atteindre la carboneutralité en 2050 entraînera des coûts nettement inférieurs à ce qui était prévu.** Une évaluation du coût marginal du scénario CN50 en 2050 et une analyse du coût de l'électrification de l'approvisionnement en énergie primaire ont toutes les deux montré que la réduction des émissions est viable économiquement et qu'elle pourrait même permettre de réaliser des économies considérables.
6. **Pour atteindre la carboneutralité, il est nécessaire d'exercer un leadership puissant et de faire immédiatement des choix qui sont difficiles.** Un certain nombre d'obstacles structurels empêchent la réalisation d'investissements rentables qui accélèreraient la transformation du modèle de production et de consommation d'énergie au Canada; parmi ces obstacles figurent notamment des programmes mal conçus, des barrières réglementaires et des freins à l'innovation, l'aversion du risque, la lenteur de l'adoption des technologies, la formation inadéquate de la main-d'œuvre, certaines incongruités financières et les tissus économiques régionaux. Ces barrières doivent être levées ou éliminées grâce à l'adoption, aux plus hauts niveaux de gouvernement, d'une approche stratégique, cohérente et intégrée permettant d'apporter des résultats significatifs dans un délai d'un à quatre ans.
7. **Le moyen le plus rentable d'atteindre les objectifs de 2030 consiste à réduire considérablement les émissions provenant du secteur pétrolier et gazier.** Maintenir les niveaux d'émissions actuels, ou réduire plus faiblement les émissions de ce secteur, nécessiterait une décarbonisation beaucoup plus rapide des autres secteurs, notamment ceux de l'électricité, du bâtiment, de l'industrie et du transport.

8. **Outre le secteur pétrolier et gazier, ce sont les secteurs industriel, commercial et électrique qui doivent fournir les plus gros efforts au départ.** Les gouvernements devraient donc principalement se concentrer sur ces secteurs particuliers. Pour respecter leurs engagements de réduction des émissions de GES, les gouvernements devraient fixer des objectifs et élaborer des programmes sectoriels spécifiques pour chacun des secteurs susmentionnés.
9. **Le secteur du transport ne se transforme pas aussi rapidement qu'on aurait pu le penser.** Alors que certaines mesures ne sont pas compatibles avec l'ambition d'atteindre la carboneutralité, comme la Norme sur les combustibles propres, l'adoption d'autres mesures ne permettra pas de tout régler, car il faut généralement de 7 à 10 ans pour que le parc de véhicules se renouvelle complètement. Pour assurer l'obtention des résultats projetés d'ici 2050, la décarbonisation des transports nécessitera également la mise en œuvre de mesures précoces et décisives à plusieurs niveaux. Il faudra des décennies pour que les efforts essentiels de conception d'un urbanisme compatible avec la carboneutralité aient un impact. De même, la transformation des transports publics lourds ainsi que la planification et la réalisation des infrastructures permettant la décarbonisation du transport des marchandises sont des projets qui pourraient demander le travail d'une décennie, et il faudra attendre de nombreuses années avant que ces mesures ne produisent des résultats.

Regarder au-delà de la modélisation

10. **Les accords internationaux actuels peuvent entraîner un phénomène d'exportation des émissions.** Les définitions de l'Accord de Paris favorisent une forte diminution de la production nationale de pétrole et de gaz avec, dans certains cas, une augmentation des importations de carburants raffinés pour satisfaire les besoins du Canada. Ceci s'explique par le fait que les émissions générées par la production de ces combustibles à l'étranger ne sont pas ajoutées au bilan de GES du Canada. De la même façon, cet accord ne tient également pas compte des émissions associées aux biens produits à l'extérieur des frontières du Canada, mais attribue au Canada les émissions des produits consommés à l'étranger. Une tarification mondiale du carbone, qui imputerait les coûts environnementaux de la consommation des biens à l'utilisateur final, permettrait d'éviter ce problème.
11. **De très bons résultats généraux ne sont pas synonymes de certitudes pour tous les changements, puisque les détails de ceux-ci seront tributaires de développements spécifiques.** Les résultats de la modélisation dépendent étroitement des hypothèses conservatrices que nous avons retenues concernant l'évolution des technologies, les obstacles aux investissements et les coûts globaux de la transformation. L'évolution de notre conception de l'agriculture et des solutions basées sur la nature demeure incertaine et même inconnue. La situation est la même en ce qui concerne les technologies qui font l'objet d'intenses travaux de développement, telles que l'hydrogène, les petits réacteurs nucléaires, le stockage d'énergie à grande échelle, nombre de processus industriels ainsi que le transport lourd. L'avenir de ces solutions dépend non seulement de la poursuite des recherches et des progrès technologiques, mais aussi des choix et des orientations politiques qui institutionnaliseront rapidement certaines solutions nécessitant des infrastructures lourdes, ce qui aura pour conséquence de réduire l'éventail des futurs différents qu'il sera possible d'envisager.

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, ces gouvernements ont surtout travaillé en vase clos, généralement sans prendre en compte ce que faisaient le palier supérieur ou inférieur de gouvernement, ou encore les autres instances administratives. **Cette approche, qui a bénéficié de milliards de dollars de subventions et de soutiens de toutes sortes, a largement échoué à réaliser les transformations promises.**

Comme le suggèrent ces Perspectives, la poursuite de cette approche ne permettra pas au Canada d'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.**