

VERS UN CANADA CARBONEUTRE

S'INSCRIRE DANS LA
TRANSITION GLOBALE



FÉVRIER 2021

CANADIAN INSTITUTE FOR
CLIMATE CHOICES



INSTITUT CANADIEN POUR DES
CHOIX CLIMATIQUES

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	3
2. LES FONDEMENTS DE LA TRAJECTOIRE DU CANADA VERS LA CARBONEUTRALITÉ	8
2.1 En quoi consiste l'objectif de carboneutralité?	8
2.2 Penser les trajectoires vers la carboneutralité	10
2.3 Notre méthode d'analyse.....	16
3. L'ÉVENTAIL DES TRAJECTOIRES POSSIBLES VERS LA CARBONEUTRALITÉ AU CANADA	21
3.1 La faisabilité de la transition énergétique au Canada	21
3.2 Le carburant de l'avenir : consommation et production d'énergie dans un Canada carboneutre.....	24
4. L'APPORT DE DIFFÉRENTES SOLUTIONS AUX TRAJECTOIRES DU CANADA VERS LA CARBONEUTRALITÉ	35
4.1 Bâtiments : chauffage des résidences et des lieux de travail.....	35
4.2 Transport : déplacement des personnes et des marchandises.....	45
4.3 Industries : notre production.....	56
4.4 Émissions négatives : pour l'atteinte de la neutralité	68
5. FAÇONNER LES TRAJECTOIRES VERS LA CARBONEUTRALITÉ POUR LE CANADA	77
5.1 Rôle des valeurs sûres et des paris risqués dans les trajectoires du Canada vers la carboneutralité	77
5.2 Trois systèmes carboneutres potentiels pour le Canada	89
5.3 Principaux moteurs de la carboneutralité au Canada.....	98
6. CONCLUSIONS PRINCIPALES	100
7. RECOMMANDATIONS	105
ANNEXES.....	108
Annexe 1: Résumé des conclusions principales d'études similaires.....	108
Annexe 2: Détail des scénarios modélisés.....	113
Annexe 3: Émissions de gaz à effet de serre dans les différents secteurs de l'économie canadienne, années sélectionnées.....	118
Annexe 4: Trajectoires de réduction des GES dans divers secteurs économiques	119
RÉFÉRENCES	128
REMERCIEMENTS.....	129

L'Institut canadien pour des choix climatiques résulte d'un travail de collaboration sans précédent entre spécialistes issus d'un grand éventail de disciplines et d'organismes à travers le pays.

En tant qu'organisation indépendante, non-partisane et financée par les fonds publics, nous menons des recherches rigoureuses et indépendantes et effectuons des analyses approfondies afin de fournir des avis éclairés concernant les défis climatiques et les choix politiques que le Canada devra faire à l'avenir.



INTRODUCTION

Le Canada s'est engagé à atteindre la carboneutralité (zéro émission nette) d'ici 2050 en réduisant ses émissions de gaz à effet de serre (GES). Le pays a déposé un projet de loi qui le contraint juridiquement à s'engager en ce sens et qui prévoit un mécanisme pour fixer des cibles de réduction quinquennales. Mais qu'implique concrètement cet engagement? Ce rapport fait la lumière sur les efforts à fournir pour atteindre l'objectif de carboneutralité au Canada; il traite des mesures à prendre pour y arriver et des effets potentiels sur notre avenir.

En bref, pour atteindre la carboneutralité, le Canada doit éliminer autant de GES dans l'atmosphère qu'il en émet, plutôt que de les laisser emprisonner la chaleur et contribuer aux changements climatiques. Pour y arriver, le pays doit effectuer une transition vers des technologies et des filières énergétiques qui affichent un bilan carbone nul et compenser les émissions inévitables en les éliminant de l'atmosphère et en les stockant de manière permanente.

L'atteinte de la carboneutralité – et ce qu'elle implique pour les citoyens d'ici 2050 – est toutefois loin d'être simple. Nos recherches révèlent qu'une multitude de façons d'envisager l'avenir carboneutre du Canada peuvent permettre d'atteindre ce grand objectif.

En fait, lorsque nous avons sollicité des perspectives partout au pays sur la vision la plus probable et la plus souhaitable, nous avons constaté que les avis – y compris ceux des experts de l'Institut – sont partagés. Les opinions diffèrent quant aux possibilités offertes par les différentes technologies et filières énergétiques carboneutres. À lui seul, le mot « nette » de « zéro émission nette » fait l'objet de multiples interprétations. Dans quelle mesure doit-on réduire les émissions existantes à la source pour parvenir à la carboneutralité, plutôt que d'utiliser des moyens naturels ou technologiques pour capter et stocker les GES?

En d'autres mots, **l'idée de la carboneutralité soulève autant de questions qu'elle apporte de réponses.** À quoi ressemblerait-elle concrètement une économie carboneutre au Canada? Est-il réaliste d'atteindre cet objectif en 30 ans? Quelles seront les répercussions à grande échelle? Quels choix s'imposeront à la population en cours de route? Quels facteurs échappent au contrôle du Canada?

Il est impératif de répondre à ces questions *sans attendre*. L'année 2050 nous semble peut-être encore loin, mais 30 ans, c'est bien peu pour transformer l'économie et les filières énergétiques d'un océan à l'autre d'une façon qui maintienne ou accroisse la prospérité et le bien-être des citoyens. Pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050, il faut prendre des mesures et

planifier dès maintenant. En l'absence de politiques visant à accélérer le progrès vers la carboneutralité au Canada, la construction d'infrastructures pérennes et émettrices se poursuivra, ce qui, à long terme, rendra la réduction des émissions plus difficile et plus coûteuse, et ce, même dans un contexte d'intensification des changements climatiques et de course aux solutions sobres en carbone sur les marchés mondiaux.

Les coûts immenses et croissants des répercussions des changements climatiques sur l'économie, la société et l'environnement montrent l'importance de prendre des mesures fortes. L'Institut prépare une série de rapports pour répertorier et quantifier ces répercussions au pays et présenter les avantages de miser sur l'adaptation et la résilience en parallèle avec la réduction des émissions. Le premier de la série, La pointe de l'iceberg, a été publié en décembre 2020 (Sawyer et coll., 2020).

Pour réussir le virage carboneutre, les différents ordres de gouvernement du Canada devront absolument envisager à la fois le court et le long terme. Ils doivent répondre à l'impératif d'agir en réduisant de manière significative les émissions dans la prochaine décennie, et préparer cette transition par de nouvelles politiques plus rigoureuses. Or il leur faudra simultanément préparer le terrain en vue de bouleversements majeurs qui nous guettent, et rester à l'affût des technologies, des marchés et de la géopolitique en constante évolution, qui sont susceptibles d'influencer ces bouleversements. **L'incertitude et les désaccords sur la forme que prendront une économie et une filière énergétique carboneutres ne justifient pas l'inaction.**

Nous étudierons ici un grand éventail de trajectoires potentielles vers la carboneutralité, de même que leurs similitudes et leurs différences, pour mieux orienter la vision d'un avenir carboneutre au Canada et clarifier les choix politiques à faire pour y arriver.

D'abord et avant tout, nous avons constaté que **l'objectif de carboneutralité d'ici 2050 est atteignable au Canada et qu'il existe plusieurs trajectoires pour**

y arriver. Si certaines d'entre elles ne pourront pas nécessairement être empruntées (selon l'évolution des marchés et de la technologie à l'échelle mondiale et nationale et les effets des politiques adoptées), il existe néanmoins assez de voies possibles pour nous permettre de conclure que l'objectif est réaliste. La diversité des trajectoires qui se dessinent ne signifie toutefois pas que le chemin sera sans embûches. Peu importe la trajectoire choisie par le Canada, la route vers la carboneutralité sera tortueuse et complexe, et requerra la mise en œuvre de politiques d'une rigueur et d'une efficacité sans précédent.

Nous avons également remarqué que d'ici 2030, dans l'ensemble, les solutions rentables pour réduire les émissions font consensus. **En effet, plusieurs d'entre elles – notamment les mesures d'efficacité énergétique, la transition vers une électricité propre et l'utilisation de thermopompes et de véhicules électriques – feront probablement partie de l'arsenal carboneutre du Canada, peu importe la trajectoire empruntée.** Ces valeurs sûres représenteront une large part des réductions d'émissions nécessaires pour que le pays atteigne les cibles de 2030. En fait, comme le montre notre graphique au bas de cette section, ces valeurs sûres sont cruciales pour l'atteinte des cibles que s'est fixé le Canada pour 2030, indépendamment de la conjoncture internationale ou du développement de technologies émergentes. Le resserrement de politiques canadiennes existantes – en particulier les codes du bâtiment, les normes flexibles sur le carburant et les véhicules ainsi que la tarification du carbone –, comme l'a prévu le gouvernement dans son plan climatique publié à la fin de l'année dernière (ECCC, 2020a), peut favoriser le déploiement rapide de ces valeurs sûres.

À long terme, le risque et l'incertitude compliquent la planification de l'atteinte de la carboneutralité. Plusieurs choses peuvent et vont changer d'ici 2050. Les changements de politiques à l'international provoqueront un ajustement des marchés. Les technologies (y compris les technologies émergentes et celles qui sont encore impossibles à prévoir) évolu-

eront et progresseront, en fonction notamment, de ces changements. Et plusieurs de ces virages potentiels échappent au contrôle du Canada. La transition apportera certainement de multiples possibilités pour le pays, mais ces dernières demeurent difficiles à déterminer avec précision. Ainsi, cette incertitude engendre nécessairement une pluralité d'opinions sur l'avenir carboneutre du Canada, une pluralité qui est même bienvenue.

Toutefois, l'incertitude entourant la voie à suivre à long terme pour le Canada place les décideurs devant des questions et des choix difficiles. Les politiques devraient-elles demeurer neutres vis-à-vis de la technologie ou plutôt viser à accélérer le développement de solutions émergentes? Le Canada devrait-il se protéger contre l'incertitude entourant certaines trajectoires? Devrait-il chercher à en favoriser certaines au détriment des autres? Quels compromis économiques et sociaux exigés par les différentes trajectoires possibles sont susceptibles d'influencer les préférences individuelles et collectives?

Le présent rapport n'apporte pas de réponses définitives à ces questions. Il constitue cependant un point d'ancrage pour mobiliser les Canadiens, les parties prenantes et les détenteurs de droits en vue de trouver des réponses. En explorant rigoureusement des trajectoires crédibles vers un avenir carboneutre en 2050, nous dotons le Canada d'un cadre permettant d'évaluer la faisabilité de ces trajectoires possibles et ouvrons un dialogue éclairé sur les compromis à faire.

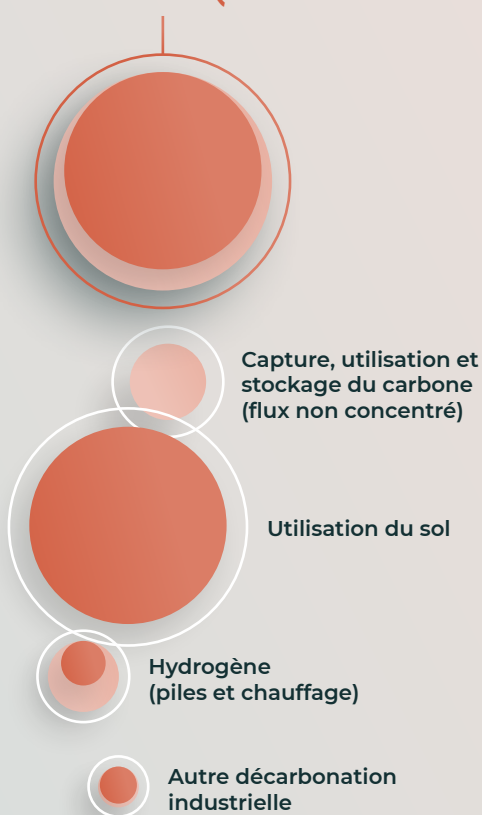
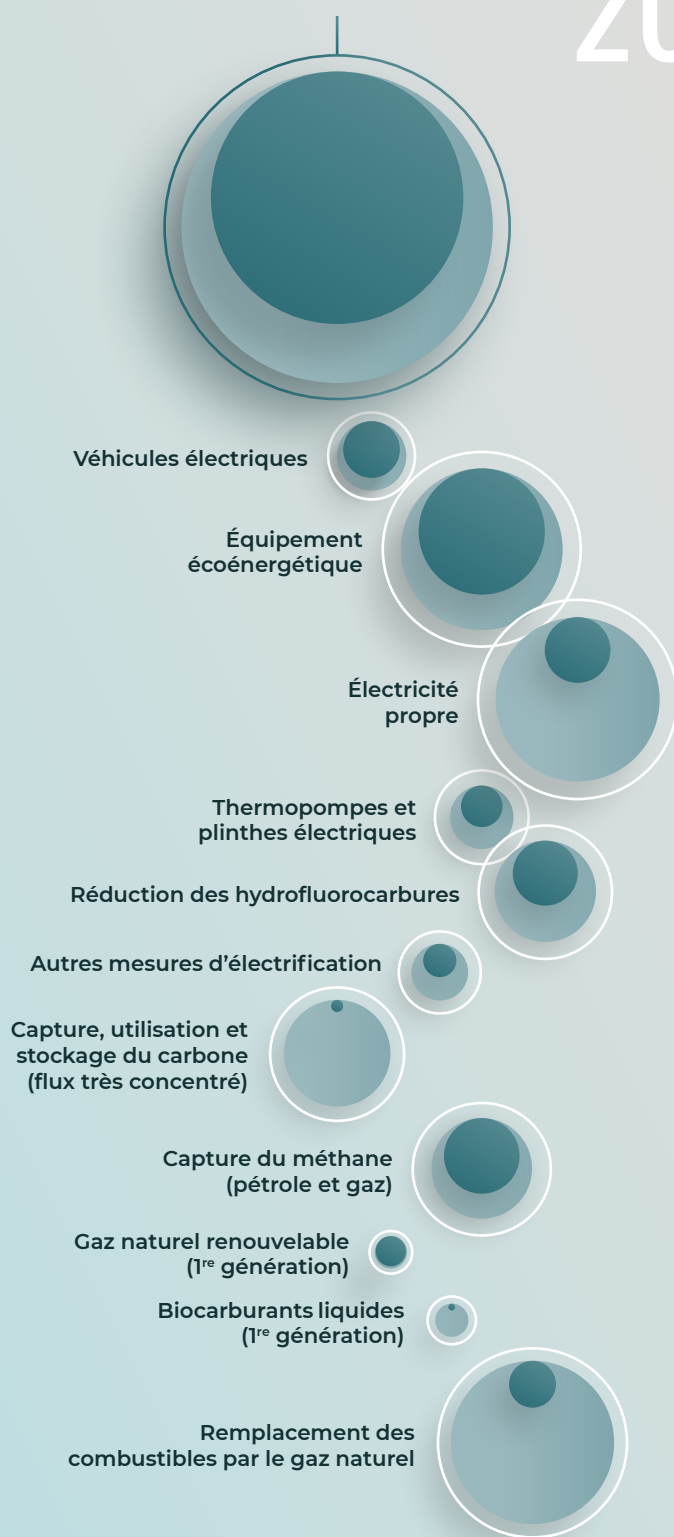
Une transition inclusive vers la carboneutralité requiert l'intégration de diverses perspectives dès maintenant, au moment où le Canada détermine la trajectoire qu'il envisage pour l'avenir. Dans plusieurs secteurs et régions au pays, ces discussions en profondeur sont déjà bien entamées. Ailleurs, elles ne font que s'amorcer. Notre analyse vise à orienter ces échanges essentiels et à y contribuer.

La suite du rapport est structurée comme suit. La section 2 décrit le défi et l'approche que nous avons choisie pour l'étudier. Elle regroupe les principaux générateurs d'incertitude et de risques d'ici 2050. Elle décrit également la méthode que nous avons utilisée pour analyser les trajectoires carboneutres possibles au Canada, qui s'appuie sur des outils d'analyse qualitative et de modélisation. La section 3 traite de la faisabilité de cette transition au pays, en étudiant les répercussions possibles sur la façon dont les Canadiens produisent et consomment de l'énergie. La section 4 examine l'influence des différentes trajectoires sur le mode de vie, le travail et les déplacements de la population. La section 5 regroupe les solutions gagnantes pour la transition en deux catégories : les valeurs sûres et les « paris risqués ». Elle examine également trois systèmes carboneutres possibles pour l'avenir du Canada, qui comportent chacun leurs compromis et leurs obstacles. La section 6 résume nos principales conclusions. Finalement, la section 7 contient des recommandations destinées à tous les ordres de gouvernement du pays pour soutenir une transition vers la carboneutralité malgré l'incertitude.

VALEURS SÛRES

2030

PARIS RISQUÉS

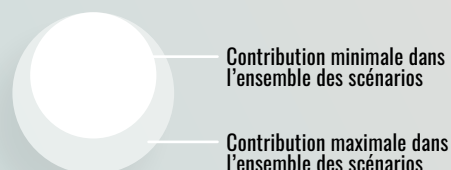


Dans tous les scénarios examinés, les **valeurs sûres** représentent la majorité des réductions en 2030. Les **paris risqués** ne seront pas encore assez développés pour jouer un rôle de premier plan.

En 2050, la contribution des **valeurs sûres** est plus variable, alors que les **paris risqués** prennent plus d'importance.

Valeurs sûres : Technologies et solutions de réduction des émissions qui sont déjà disponibles commercialement et qui ne font face à aucune contrainte majeure pour être mises en œuvre à grande échelle.

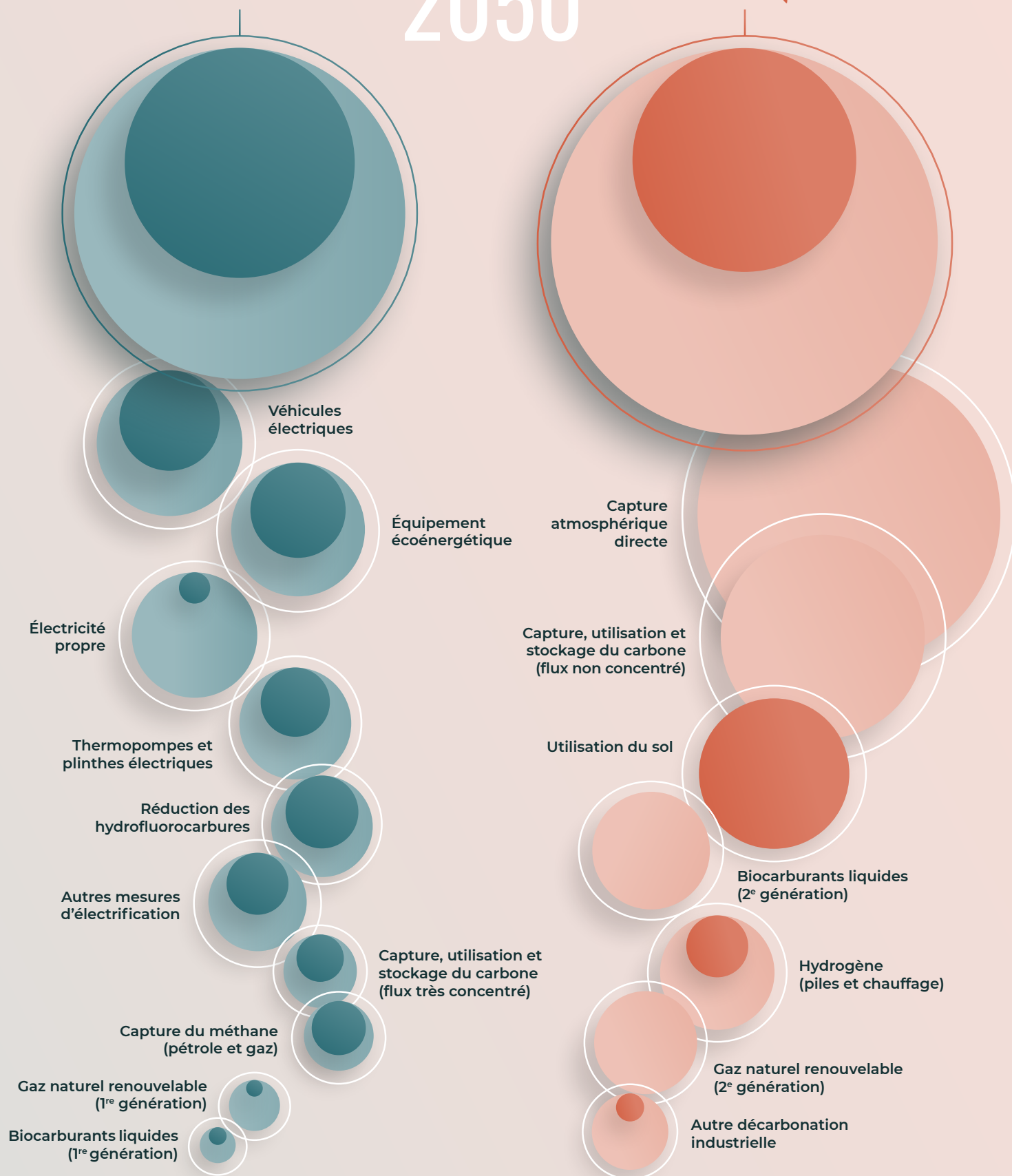
Paris risqués : Solutions qui pourraient jouer un rôle important et significatif vers l'objectif de carboneutralité, mais dont les perspectives demeurent incertaines.



VALEURS SÛRES

2050

PARIS RISQUÉS





LES FONDEMENTS DE LA TRAJECTOIRE DU CANADA VERS LA CARBONEUTRALITÉ

Cette section présente une mise en contexte du défi qui attend le Canada et décrit l'approche que nous avons utilisée pour évaluer les trajectoires possibles vers la carboneutralité.

2.1 EN QUOI CONSISTE L'OBJECTIF DE CARBONEUTRALITÉ?

En 2019, le gouvernement a annoncé qu'il visait une réduction à long terme des émissions de gaz à effet de serre afin de parvenir à la carboneutralité d'ici 2050 (ECCC, 2019a). Ce concept, relativement nouveau dans bien des milieux, est aisément confondu avec d'autres aspects de la lutte contre les changements climatiques à l'échelle nationale et internationale. Nous commencerons donc par clarifier ce terme et les critères que nous utiliserons dans l'analyse de ses répercussions pour les Canadiens.

Comment définir la carboneutralité

Pour parvenir à la carboneutralité, deux avenues s'offrent au Canada : éliminer totalement ses émissions ou trouver des façons de retirer de l'atmosphère les GES qu'il continue de générer (et les stocker de manière permanente) plutôt que de les laisser emprisonner la

chaleur et contribuer aux changements climatiques.

D'un point de vue plus technique, on pourrait définir la carboneutralité comme un système énergétique et économique dans lequel, si l'on soustrait les « émissions négatives » – soit le dioxyde de carbone (CO₂) éliminé par des moyens naturels ou techniques – de l'ensemble des émissions de GES au Canada provenant de la production et de la consommation d'énergie, des processus industriels et de l'exploitation des terres, on obtient un total de zéro émission nette¹.

L'atteinte de la neutralité carbone au Canada relève autant de la comptabilité que de la physique, et la façon dont le gouvernement fédéral et les autres gouvernements au pays définiront cet objectif reste à préciser. Toutefois, dans le cadre du présent rapport, nous avons utilisé trois paramètres clairs pour le définir :

1. Utilisation d'un système de comptabilité nationale;
2. Comptabilisation des émissions brutes et des émissions négatives;
3. Exclusion des mécanismes de transfert internationaux.

Comment ces trois paramètres façonnent-ils notre définition de la carboneutralité?

1 Il existe d'autres définitions de la carboneutralité qui tiennent compte seulement des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) sans nécessairement comptabiliser les autres GES. L'objectif de l'accord de Paris de limiter l'augmentation mondiale de la température à 1,5 °C implique l'atteinte de la carboneutralité, la réduction de 50 % des émissions de méthane, la réduction d'un tiers des émissions de dioxyde d'azote (NO₂) et la réduction d'au moins 50 % des émissions de charbon noir à l'échelle mondiale d'ici 2050.

D'abord, avec un système de comptabilité nationale, seules les émissions produites en territoire canadien sont comptabilisées. Les biens et les carburants produits au Canada et consommés à l'étranger peuvent bien sûr faire augmenter les émissions mondiales, mais notre analyse ne tient pas compte des émissions générées à l'extérieur des frontières. Cette méthode est comparable à bien d'autres méthodes de comptabilisation des GES dans le monde. Nous avons également exclu les émissions générées à l'étranger au cours de la production et du transport de biens importés, ce qui s'inspire également d'autres méthodes de comptabilisation à l'international². Cette méthode tient compte du fait que ces émissions seront comptabilisées dans les plans et les politiques climatiques d'autres pays.

Ensuite, la comptabilisation des « crédits » et des « débits » d'émissions permet d'inclure les émissions négatives (séquestrées par des solutions naturelles ou techniques), lorsqu'elles sont authentiques et vérifiables, comme méthode viable de compensation des émissions brutes pour atteindre la neutralité carbone. Il n'est toutefois pas simple de s'assurer de la crédibilité de la comptabilisation de ces émissions; il faut vérifier des paramètres comme l'additionnalité (établir si les émissions auraient été séquestrées sans intervention, de manière naturelle ou non), la comptabilisation (s'assurer que le compte d'émissions correspond à la quantité réelle des émissions séquestrées, en particulier lorsque les effets des processus naturels ne peuvent être qu'estimés) et la permanence (s'assurer que les émissions négatives stockées dans des formations géologiques ou dans la biomasse y demeurent de manière plus ou moins permanente)³.

Enfin, l'exclusion des mécanismes de transfert internationaux signifie que les trajectoires que nous avons

envisagées ne permettent pas de compenser les émissions par des transferts internationaux au moyen de systèmes d'échange comme ceux prévus par l'article 6 de l'accord de Paris. Nous les excluons, car ils ne sont pas encore définis par la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)⁴. En outre, de profonds désaccords persistent quant à ces transferts : une fois officialisés, devraient-ils être reconnus dans chaque pays comme une façon légitime d'atteindre ses objectifs ou devraient-ils servir strictement à fixer des objectifs mondiaux plus ambitieux?

Une tendance qui s'accélère

Avec sa promesse de carboneutralité, le Canada aligne sa cible d'émissions de GES à long terme avec les recommandations du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) de l'Organisation des Nations Unies, qui préconise lui aussi l'atteinte de la carboneutralité à l'échelle mondiale d'ici 2050 pour réduire le risque de conséquences catastrophiques des changements climatiques et limiter le réchauffement mondial à 1,5 °C. Le fait de rater cette cible aurait de graves répercussions à l'échelle planétaire : perte de biodiversité, températures extrêmes, catastrophes naturelles coûteuses (Hoegh-Guldberg et coll., 2018)... Depuis l'annonce du gouvernement fédéral, plusieurs acteurs majeurs du secteur privé lui ont emboîté le pas : pensons notamment à Cenovus Energy, grand producteur de pétrole des sables bitumineux, ou à l'Association canadienne des producteurs d'acier. Diverses entreprises et des groupes industriels à l'international se sont également engagés dans cette voie : notamment de grandes pétrolières comme BP, Total et Occidental, des entreprises comme Patagonia et The Body Shop, ou la Asset Owner Alliance, qui regroupe certains des plus grands fonds de pension et assureurs au monde.

2 Bien que les méthodes de comptabilisation de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) excluent ces sources de l'inventaire des émissions nationales, il demeure possible pour les pays de les mesurer et de les rapporter, comme le fait le Royaume-Uni. Certaines entreprises (notamment BP, Shell, Equinor et Repsol) ont commencé à les comptabiliser et à les inclure dans leurs cibles de réduction.

3 Certaines méthodes comptables de la CCNUCC permettent de quantifier le CO₂ séquestré dans la biomasse et dans le sol. Il n'existe toutefois pas encore de mécanismes permettant de quantifier la séquestration résultant de solutions techniques à émissions négatives.

4 Nous ne les avons pas exclus parce qu'un système de plafonnement et d'échange tel que celui qui lie la Californie et le Québec n'a aucune chance d'être reconnu selon les méthodes de la CCNUCC, mais plutôt parce qu'il n'existe aucune reconnaissance officielle de ce type de lien ni aucun consensus à l'horizon en ce qui concerne les critères de reconnaissances officiels (c.-à-d. des objectifs de réduction des émissions comparables entre la province et l'État).



Le Canada s'inscrit donc dans une tendance mondiale qui s'accélère rapidement. En effet, plus de 100 pays représentant plus de la moitié du produit intérieur brut (PIB) mondial se sont engagés dans la voie de la carboneutralité ou travaillent en ce sens; pensons à l'Allemagne, au Danemark et au Royaume-Uni, qui donnent le ton de la transition énergétique mondiale. La Corée du Sud et le Japon se sont engagés à atteindre la carboneutralité, tout comme la Chine, le plus grand émetteur au monde (CGTN, 2020). Des États américains parmi les plus grands et influents (Californie, New York et Washington), un groupe de métropoles mondiales (dont Paris, Oslo, Stockholm et Buenos Aires) ainsi que plusieurs provinces canadiennes⁵ figurent également parmi les grands acteurs de ce mouvement.

2.2 PENSER LES TRAJECTOIRES VERS LA CARBONEUTRALITÉ

Dans le cadre du présent rapport, nous définissons les trajectoires vers la carboneutralité comme des moyens plausibles et intrinsèquement cohérents pour parvenir à cet objectif selon les informations actuelles. Un scénario de carboneutralité pour 2050 n'a de sens que s'il existe une solution plausible pour y parvenir. La crédibilité d'une trajectoire repose sur des conditions et des résultats qui sont cohérents entre eux.

Les trajectoires envisagées dans ce rapport ne font pas office de prédictions; l'avenir est beaucoup trop incertain. Il s'agit plutôt d'un tour d'horizon des possibilités offertes dans la poursuite de cet objectif au pays, de même que des perspectives et des compromis qui y sont rattachés.

⁵ En 2019, au Canada, la Nouvelle-Écosse a adopté une loi qui la contraint à atteindre la carboneutralité d'ici 2050. En 2020, Terre-Neuve-et-Labrador a déclaré son intention de faire de même, tout comme le Québec et le Yukon. Au municipal, la Ville de Toronto s'est aussi fixé un objectif de carboneutralité d'ici 2050 dans le cadre de sa déclaration de situation d'urgence climatique.

Quel sont les principaux facteurs à l'œuvre dans les trajectoires possibles vers la carboneutralité?

Les trajectoires qui s'offrent au Canada pour atteindre la carboneutralité dépendent, dans l'absolu, d'une multitude de facteurs – économiques, politiques, culturels et technologiques – qui produisent des résultats précis et qui interagissent tout au long du processus. Le Canada a un contrôle total ou partiel sur certains de ces facteurs, tandis que d'autres lui échappent complètement. Plusieurs demeurent encore incertains.

L'innovation technologique sera certainement un facteur déterminant dans l'atteinte de la carboneutralité. Les baisses de coûts qui en découlent peuvent véritablement changer la donne. Pensons à la chute des prix de l'énergie solaire qui a rapidement fait de cette technologie autrefois marginale une filière répandue : en dix ans, les coûts de l'énergie solaire commerciale ont chuté de 82 % et le nombre d'installations solaires a été multiplié par plus de 14 (IRENA, 2020; IRENA, 2019). Grâce à de tels virages spectaculaires, la technologie s'améliore et son prix baisse. Ils offrent aussi l'occasion d'apprendre à utiliser l'équipement plus efficacement.

Les baisses de coûts des technologies propres s'expliquent de plusieurs façons : investissements dans la recherche et le développement, apprentissage par la pratique, économies d'échelle, diffusion des connaissances... Le Canada, par ses politiques et ses décisions d'investissement, a une certaine influence sur ces coûts. Il a cependant peu de contrôle sur un facteur important : les politiques internationales. Les initiatives prises par les gouvernements du reste du monde auront un effet déterminant sur les trajectoires que le Canada pourra emprunter et leur coût relatif. Cet effet s'explique par les baisses de coûts des technologies propres engendrées par l'action concertée dans d'autres pays (en raison de la diffusion des connaissances et des économies d'échelle à l'international) et par les possibilités créées pour les entreprises cana-

diennes qui produisent des biens et des services liés aux technologies propres. Par ailleurs, les mesures prises à l'international peuvent également faire augmenter le coût de certaines options carboneutres si elles augmentent la concurrence pour l'obtention de certaines ressources essentielles.

Dans le même ordre d'idées, les choix politiques faits à l'extérieur des frontières canadiennes fixeront la demande mondiale de pétrole, de gaz et de charbon au cours des prochaines années, ce qui influencera la trajectoire nationale vers la carboneutralité et le marché canadien des exportations de combustibles fossiles. Des facteurs comme l'augmentation de la vente de véhicules électriques ou une production soutenue à grande échelle par d'autres pays pourraient continuer de faire baisser les prix et mener à une croissance plus lente, voire à un déclin de la production pétrolière et gazière au Canada qui ferait diminuer les émissions de ce secteur. Si, au contraire, les prix du pétrole et du gaz montent en flèche dans les années à venir, la production au Canada pourrait demeurer fixe ou augmenter, ce qui compromettrait l'atteinte de la carboneutralité du secteur pétrolier et gazier et de l'ensemble de l'économie.

La viabilité à long terme d'une catégorie de solutions – celles à émissions négatives – pourrait avoir des répercussions majeures sur la façon dont la carboneutralité sera atteinte au Canada. Les grands espaces offrent énormément de potentiel pour la séquestration naturelle des GES, mais les mesures pour y arriver doivent tenir compte des répercussions sur les droits, les titres et les territoires traditionnels des peuples autochtones. Elles soulèvent également des questions quant aux autres utilisations des terres, notamment la production alimentaire et la protection de la biodiversité. Des technologies à émissions négatives, comme la captation atmosphérique directe et la bioénergie avec captage et séquestration du carbone, peuvent aussi grandement servir l'objectif national et ouvrir des débouchés économiques intéressants. Mais ces solutions sont encore à l'étape de démonstration et on ne peut affirmer avec certitude que l'une d'entre elles

s'avérera rentable et utilisable à grande échelle (voir l'encadré 4 pour une explication des solutions à émissions négatives).

Enfin, les politiques de tous les ordres de gouvernement au Canada joueront un rôle déterminant pour construire l'avenir carboneutre du pays. Elles influenceront non seulement le choix de sa trajectoire, mais également, en amont, le spectre de celles qui seront possibles. Les initiatives fédérales, provinciales, territoriales et autochtones – règlements, normes, programmes et tarification du carbone, entre autres – donneront le ton à l'adoption de solutions sobres en carbone, influenceront sur la diversité des technologies développées et détermineront quelles technologies et solutions s'offriront aux entreprises et aux ménages canadiens.

Quels facteurs ne sont pas considérés dans notre analyse?

Bien d'autres facteurs sont susceptibles de modifier les trajectoires du Canada de manière importante et imprévisible. Notre analyse, dans l'ensemble, n'en tient pas compte en raison de la grande incertitude qui les entoure.

Les effets à grande échelle de l'innovation sont difficiles à prévoir. À titre d'exemple, le développement

rapide de l'intelligence artificielle pourrait accélérer d'autres changements technologiques ou en accroître sensiblement l'efficacité. Nous pourrions aussi assister à des bonds technologiques, des innovations révolutionnaires allant de petits réacteurs nucléaires modulaires à une technologie de stockage d'électricité nettement moins coûteuse. Peu probables à court terme, ces bonds technologiques ont tout de même le potentiel de redessiner notre trajectoire vers la carboneutralité du jour au lendemain.

Les préférences du marché concernant les enjeux climatiques sont déjà en train de changer, mais ces changements sont amenés à s'accélérer encore bien davantage. L'importance centrale que pourraient prendre les risques et les occasions liés aux changements climatiques dans les décisions courantes des investisseurs pourrait accélérer la transition mondiale vers la carboneutralité (Makortoff, 2020).

Les changements géopolitiques comportent la même dose d'incertitude. En effet, des perturbations politiques à l'international pourraient miner les efforts de coordination de l'action climatique, tandis qu'un essor de l'activisme écologique accentuerait la pression populaire sur les décideurs et les inciterait à prendre des mesures plus ambitieuses plus rapidement. Par ailleurs, l'évolution que connaîtra le système finan-



La transformation du marché mondial et la géopolitique sont susceptibles de modifier les trajectoires du Canada vers la carboneutralité de manière importante et imprévisible.

cier mondial dans son ensemble se répercutera sur la poursuite de la carboneutralité; par exemple, un système mondial plus intégré rendrait probablement les technologies sobres en carbone plus abordables et faciles à obtenir qu'un nationalisme qui enfermerait chaque pays dans sa tour d'ivoire.

Quels autres facteurs sont à considérer?

Les facteurs qui précèdent détermineront la viabilité des différentes trajectoires, leurs coûts et leurs répercussions. Toutefois, il faut tenir compte d'un éventail d'autres facteurs pour comparer et évaluer les conséquences et les résultats probables de ces trajectoires.

Le plus important, sans doute, c'est que les politiques adoptées au Canada auront un effet au-delà du niveau d'émissions. L'un des facteurs déterminants du succès du plan de carboneutralité du Canada réside dans la réduction des inégalités sociales. Les retombées positives d'une économie nationale à fortes émissions ne profitent pas à tous équitablement : par exemple, en 2018, plus de 10 % des ménages canadiens ne bénéficiaient pas d'un logement assez sécuritaire, adéquat ou abordable (Statistique Canada, 2020). Les enjeux de justice sociale, raciale et environnementale sont au cœur de la transition. Les politiques gouvernementales (ou leur absence) seront déterminantes pour l'équité de la transition, l'atténuation des répercussions négatives sur les secteurs et les travailleurs affectés, et l'importance des cobénéfices de diverses actions climatiques (p. ex., la réduction de la pollution de l'air) dans la prise de décision.

Les variations régionales dans les émissions traduisent d'importants écarts entre les provinces, les territoires et les secteurs quant aux défis de la carboneutralité. L'Alberta et la Saskatchewan, par exemple, où l'industrie pétrolière et gazière occupe une place importante,

devront surmonter des obstacles bien différents de ceux de provinces où l'hydroélectricité prédomine, comme le Québec et la Colombie-Britannique. Par ailleurs, le Nord, qui connaît des difficultés sociales et économiques et qui dépend toujours du diesel dans beaucoup, fait face à des enjeux qui lui sont propres⁶.

Ces différences entre les régions et les secteurs sont amplifiées par la nature de la gouvernance au Canada, une fédération décentralisée, qui oblige le gouvernement fédéral et les provinces et territoires à se partager la responsabilité de mener sur plusieurs fronts la trajectoire vers la carboneutralité. Les politiques climatiques, par exemple, sont établies par les deux ordres de gouvernement, tandis que d'autres domaines cruciaux pour la réduction des émissions – en particulier le développement des ressources naturelles, la production et le transport d'électricité – relèvent presque entièrement des provinces et territoires.

Les peuples autochtones jouent un rôle important dans la question de la gouvernance : la trajectoire vers la carboneutralité du Canada doit respecter leurs droits, et leurs communautés ont des connaissances et des compétences vitales pour la transition. Le gouvernement du Canada s'est engagé à prioriser la réconciliation avec les peuples autochtones après des siècles de colonisation, de marginalisation et de négligence qui se poursuivent encore aujourd'hui. La voie vers la carboneutralité du Canada devrait reconnaître les droits existants des peuples autochtones (conformément à l'article 35 de la Constitution canadienne) et refléter les principes de la Déclaration des Nations Unies sur les droits des peuples autochtones (dont le Canada est signataire). Dans l'encadré 1, il est question des visions du monde, des connaissances et des actions par lesquelles ils peuvent influencer la transition.

⁶ Notre analyse vise à faire ressortir les répercussions régionales lorsque possible, mais dans plusieurs cas, la complexité de l'analyse nous contraint à rester à l'échelle nationale. Nous prévoyons effectuer des analyses complémentaires par région ultérieurement.

ENCADRÉ 1



*Le parc solaire d'Old Crow est géré et possédé par la Première Nation Vuntut Gwitchin au Yukon
(Photo: Vuntut Gwitchin Government)*

Visions du monde et leadership autochtones en matière de changements climatiques

Les Autochtones de toutes les communautés et de toutes les cultures ne partagent pas une seule et même vision du monde ; il existe une aussi grande diversité de langues, de visions du monde et d'expériences qu'il y a de nations. De cette diversité, il est toutefois possible de tirer une série de principes centraux qui pourraient avoir une grande incidence sur l'avenir carboneutre du pays, principes notamment fondés sur une vision holistique de la nature dans laquelle tous les éléments – les gens, les objets, l'environnement – sont interreliés. Selon cette vision, la terre – sacrée – ne devrait pas servir à l'exploitation et à l'extraction au profit des humains, et la technologie devrait intégrer et respecter cet équilibre avec le monde naturel (Little Bear, 2009; Little Bear, 2012). Il est primordial de comprendre et de respecter les divergences entre les visions du monde autochtones pour établir des relations significatives entre les peuples autochtones et non autochtones au Canada, afin de fonder l'atteinte de la carboneutralité sur un respect et une compréhension réciproques. La trajectoire du Canada vers la carboneutralité offre de multiples occasions de faire progresser la souveraineté et l'autodétermination des peuples autochtones, de même que la justice sociale et environnementale.

Particulièrement vulnérables aux répercussions des changements climatiques en raison de conditions géographiques, économiques et sociales perpétuées par la discrimination

systemique et le colonialisme, les peuples autochtones sont aussi particulièrement bien placés pour s'y préparer et y réagir. Forts de leur savoir traditionnel et régional et aidés de la technologie, les peuples autochtones luttent d'un océan à l'autre contre les changements climatiques, générant ainsi des possibilités et des retombées pour leurs communautés.

Il est impératif de tirer profit des savoirs autochtones et locaux pour la gestion et la conservation des écosystèmes. Les peuples autochtones utilisent leur grande connaissance du territoire – leur moyen de subsistance depuis des générations – pour préserver la biodiversité et protéger la santé à long terme de l'air, des terres et des cours d'eau. Depuis quelques années, les programmes autochtones de gardiens ont mobilisé des communautés autour de la gestion et de la protection de leurs territoires et de leurs cours d'eau ancestraux dans le respect des lois et des valeurs traditionnelles. Plus de 40 nations et communautés autochtones au Canada se sont dotées d'un tel programme de gardiens (Indigenous Leadership Initiative, 2020). En 2020, l'une d'elles, la nation des Dénés Lutsel K'e des Territoires du Nord-Ouest, a reçu le prix Équateur du Programme des Nations Unies pour le développement, prix qui récompense des peuples autochtones et des communautés locales pour leurs solutions innovantes basées sur la nature. Ce prix soulignait le travail de cette nation dans la création de Thaidene Nene, une aire protégée de 26 300 km², en collaboration avec Parcs Canada et le gouvernement des Territoires du Nord-Ouest (Nature United, 2020).

Plusieurs communautés autochtones du Canada réalisent également des projets visant l'autonomie énergétique, l'établissement de systèmes énergétiques plus fiables, le développement communautaire et économique, et la réduction des émissions. Les communautés de toutes les provinces et de tous les territoires du Canada ont mis en œuvre des centaines de projets : énergie solaire, énergie éolienne, biomasse, hydroélectricité, rénovation de bâtiments (Indigenous Clean Energy, 2020)... À titre d'exemple, le projet d'énergie solaire d'Old Crow, géré et détenu par la Première Nation des Vuntut Gwitchin au Yukon, devrait combler tous les besoins en électricité de la communauté durant l'été lorsque le soleil brille et réduire sa consommation annuelle de diesel de 190 000 litres (Conseil de l'Arctique, 2020).

Pour être efficaces, les politiques du Canada devront également être choisies soigneusement, de manière à tenir compte de relations intergouvernementales complexes. Mais la gouvernance décentralisée qui caractérise le pays offre aussi la possibilité d'adopter un éventail de politiques adaptées à l'économie, au profil d'émissions et à la stratégie de réduction de chaque région. Bien entendu, les gouvernements fédéral, provinciaux, territoriaux, municipaux et autochtones prennent déjà leurs propres mesures, par l'établissement de cibles climatiques et la conception de cadres et de politiques visant à les atteindre. Pour coordonner ce travail, il faut mettre en place un cadre de responsabilisation climatique qui prévoit, en collaboration avec des experts, des cibles à atteindre tout au long du processus, comme l'a fait valoir le gouvernement fédéral et comme nous l'avons écrit dans le rapport *Baliser le chemin : légiférer nos objectifs climatiques en route vers 2050* (Beugin et coll., 2020).

2.3 NOTRE MÉTHODE D'ANALYSE

En nous basant sur des modélisations, sur l'analyse de la documentation et sur l'avis d'experts et de détenteurs de savoir, nous avons déterminé et évalué plus de 60 trajectoires économiques différentes permettant d'atteindre la carboneutralité d'ici 2050. Chacune d'entre elles résulte d'une combinaison particulière de solutions de réduction d'émissions, d'après un éventail de conditions et d'hypothèses différentes.

Voici l'approche globale que nous avons utilisée pour évaluer les trajectoires vers la carboneutralité.

Nous avons d'abord entrepris **une analyse de la documentation** sur les trajectoires visant à réduire considérablement les émissions au Canada et à l'international afin d'y cibler les tendances, les facteurs et les répercussions principaux. Cette analyse nous a permis de relever les facteurs énoncés précédemment ainsi que des comparaisons qui nous ont aidés à fonder

nos analyses subséquentes sur des données avérées. Plusieurs de ces études portaient sur le Canada, mais nous avons également analysé des recherches sur la carboneutralité ou la décarbonisation profonde de l'Union européenne, du Royaume-Uni et des États-Unis. (Une vue d'ensemble et les grands constats de ces analyses se trouvent à l'annexe 1.)

Nous nous sommes ensuite servis d'un modèle général de l'économie, des émissions de GES et du système énergétique du Canada pour définir **un vaste éventail de trajectoires économiques** en tenant compte de divers facteurs et hypothèses (voir l'encadré 2). Ce modèle nous a permis de vérifier la cohérence interne des trajectoires, c'est-à-dire de s'assurer que les hypothèses n'étaient pas contradictoires et que l'économie canadienne actuelle était liée aux différents scénarios de carboneutralité par des trajectoires crédibles. Avec ce modèle, nous avons également pu déterminer les conditions essentielles pour suivre diverses trajectoires de carboneutralité (voir l'annexe 2 pour une description détaillée des scénarios et des hypothèses envisagés). Dans l'ensemble, ces scénarios prennent en compte les principaux aspects des risques et des incertitudes concernant la transition au Canada.

Soulignons que ces trajectoires ne sont pas liées à des choix politiques précis : diverses combinaisons de réglementations, de politiques de tarification du carbone et même de dépenses publiques permettraient de les concrétiser⁷. De telles politiques pourraient être fédérales, provinciales, territoriales, municipales ou autochtones. Le modèle n'analyse pas de choix politiques en particulier; il se concentre plutôt sur la manière dont les autres facteurs et conditions pourraient faire dévier les trajectoires potentielles pour le Canada.

Troisièmement, nous avons évalué les **répercussions de ces trajectoires**. Nous avons utilisé notre modèle pour étudier les retombées macroéconomiques, comme les modifications structurelles de l'économie, de même

⁷ Bien que notre modèle ne comporte pas d'hypothèse sur les politiques nécessaires pour mettre en place les trajectoires que nous envisageons, il reflète tout de même les politiques climatiques actuelles du Canada. Plus précisément, il utilise les politiques du scénario « avec mesures supplémentaires » du Quatrième rapport biennal du Canada sur les changements climatiques à la CCNUCC, présentées dans le tableau A2.39. Il s'agit de politiques en place ou annoncées en septembre 2019 (ECCC, 2019b).



que les retombées microéconomiques, comme l'utilisation et le coût de l'énergie par ménage. Nous avons également mesuré les répercussions sur la qualité de l'air et les bienfaits pour la santé de différentes trajectoires avec un deuxième outil de modélisation⁸. Nous étions cependant conscients que notre modèle, bien qu'utile, demeurerait limité et incomplet. Par conséquent, nous avons également évalué les répercussions qualitativement, en nous appuyant sur une documentation pertinente et une analyse secondaire.

Quatrièmement, nous avons effectué **des comparaisons entre les trajectoires** révélées par notre analyse, en nous concentrant notamment sur les résultats communs à divers scénarios de même que sur les principaux facteurs à l'origine de divergences marquées. La plupart des résultats présentés ici ne sont donc pas associés à un scénario en particulier, mais bien au vaste éventail de possibilités offertes par l'ensemble des scénarios. Plutôt que des estimations particulières, les figures du rapport présentent des résultats globaux.

Cinquièmement, nous avons évalué **trois systèmes carboneutres potentiels qui supposeraient des trajectoires significativement différentes** : un système s'appuyant sur les émissions négatives et

les combustibles fossiles, un système fondé sur les biocarburants, et un troisième système s'appuyant sur l'hydrogène et l'électrification. Pour ancrer nos conclusions dans le concret, nous sommes ensuite allés au-delà du modèle. Pour chacun de ces systèmes carboneutres, nous avons étudié les résultats et les répercussions probables en utilisant des outils d'analyse quantitative et qualitative.

Nous avons aussi évalué **la faisabilité de ces différents systèmes** en tenant compte des entraves à leur concrétisation. Pour chaque trajectoire, nous avons déterminé quels étaient les différents facteurs susceptibles d'être influencés par les politiques canadiennes, les facteurs sur lesquels ces politiques n'ont aucune influence et les principales incertitudes et questions ouvertes.

Tout au long de ce processus, nous avons tenu compte **d'une diversité de points de vue** – en consultant des experts universitaires, des professionnels, des entreprises, des associations industrielles, les gouvernements fédéral et infranationaux, des peuples autochtones et des syndicats – pour tester nos hypothèses et nos résultats et nous assurer de la représentativité, de la crédibilité et de la pertinence de nos conclusions pour des publics et des décideurs d'horizons divers.

⁸ Cet outil utilise les trajectoires d'émissions de CO₂ simulées par gTech comme données d'entrée (voir l'encadré 2). Il estime les émissions de principaux contaminants atmosphériques associés aux émissions par secteur et par province de nos différents scénarios de modélisation. Puis, avec le modèle Community Multiscale Air Quality (CMAQ) de la Environmental Protection Agency des États-Unis, il attribue aux répercussions sur les différentes régions un compte de mortalité nationale associé à l'exposition chronique à la pollution particulière de l'air et sa valeur financière. Combinées aux projections de profils d'émissions par secteur basées sur des tendances historiques, ces répercussions sont agrégées en estimation du fardeau de la pollution de l'air sur la santé la population de chaque province dans différentes trajectoires. Pour en savoir plus, voir Soltanzadeh et Hakami (2020).

ENCADRÉ 2

L'outil de modélisation gTech et notre sélection de scénarios

Dans le cadre du présent rapport, nous nous sommes servis de gTech, un outil de modélisation de Navius Research, pour analyser les répercussions régionales, sectorielles, technologiques et économiques de l'atteinte de la carboneutralité au Canada d'ici 2050. Il s'agit d'un modèle d'équilibre général calculable avec dynamique récursive dont les résultats sont basés sur des représentations détaillées de technologies liées à l'énergie, de données sur le comportement et les préférences des consommateurs, et des indicateurs macroéconomiques canadiens (pour en savoir plus, voir Navius Research 2021).

Le modèle gTech brosse un portrait technologique détaillé. Un large spectre de technologies énergétiques y figure, allant des véhicules de 41 types différents aux diverses technologies de production de chaleur dans l'industrie du pétrole brut. Régulièrement mis à jour pour refléter les progrès technologiques et commerciaux, le modèle rend compte des technologies disponibles – les carburants ou autres sources d'énergie qu'elles utilisent, leur efficacité énergétique, leurs émissions de GES et leur coût. Il tient aussi compte de l'évolution du coût et du rendement de ces technologies dans le temps, évolution basée sur la documentation pertinente et l'avis d'experts. (Les hypothèses de ces projections sont modifiables d'un scénario à l'autre, ce qui permet de mieux comprendre leur importance.) Le modèle intègre aussi des technologies émergentes ou potentielles. Les projections concernant le moment de leur émergence, l'évolution de leur coût et leur efficacité sont basées sur la documentation pertinente et l'avis d'experts. La disponibilité et l'indisponibilité peuvent être activées pour chaque hypothèse, et l'évolution de leur coût et de leur rendement est aussi paramétrable. La précision technologique du modèle gTech dans son ensemble permet une analyse approfondie des aspects économiques de diverses technologies, de l'utilisation prévue de ces dernières dans différentes conditions et hypothèses, et de leur effet sur la consommation d'électricité et les émissions de GES.

Ce modèle reproduit l'économie canadienne en détail. Il comporte 110 secteurs, un secteur de la main-d'œuvre et un secteur public. Comme dans l'économie canadienne, les biens et services produits par ces secteurs servent d'entrée aux autres secteurs. Ces échanges sont basés sur les tableaux d'entrées et de sorties de Statistique Canada. Le modèle utilise l'interaction entre l'offre et la demande dans ces secteurs pour simuler le niveau de production et le prix des biens et des services. Il simule l'économie non seulement à l'échelle du pays, mais aussi à l'échelle des provinces et territoires. Il repose sur des projections crédibles de la population, de la démographie (y compris la répartition des revenus) et de la croissance de la population active à l'échelle nationale et régionale. Il simule le commerce international en tenant compte de la sensibilité des importations et des exportations aux variations de prix sur le marché canadien et en utilisant des projec-

tions crédibles de la demande internationale en biens et marchandises. Il intègre l'économie des États-Unis en profondeur et simule explicitement leur relation commerciale avec le Canada. Toutes les relations sont régulièrement recalibrées avec des données historiques réelles pour faire en sorte que le modèle offre une représentation fidèle de l'économie canadienne.

Ce modèle simule les comportements et les choix de manière réaliste. Plutôt que de présumer que les choix des entreprises et des consommateurs sont strictement basés sur le coût et le rendement du capital investi, gTech se base sur des études empiriques pour modéliser leurs préférences. À titre d'exemple, pour l'évaluation des coûts initiaux par rapport aux économies à long terme dans les décisions d'achat des ménages, le modèle utilise un taux d'actualisation qui reflète le comportement des consommateurs plutôt qu'un taux d'actualisation financier qui surestime la valeur des épargnes projetées. Il tient compte des coûts « intangibles » associés aux nouvelles technologies (qui reflètent la réticence des consommateurs à adopter une technologie peu familière) et de la baisse des coûts lorsque ces dernières deviennent plus répandues, ce qui représente l'effet de proximité relevé par des études sur l'adoption de technologies. Le modèle simule également les décisions d'investissement des entreprises en utilisant des taux de rendement internes supérieurs aux taux d'intérêts commerciaux, à la manière d'un authentique processus décisionnel d'entreprise.

Comme tous les modèles, gTech est imparfait. À titre d'exemple, ses résultats varient selon le choix des entrées exogènes (externes). Pour nous assurer de leur exactitude, nous avons fait faire un examen technique d'un grand nombre des principales hypothèses et entrées. Nous avons également rectifié certaines d'entre elles dans les scénarios envisagés afin de nous assurer de la solidité des principaux résultats et des principales hypothèses susceptibles de teinter nos conclusions.

Nous avons utilisé gTech pour étudier un grand éventail de trajectoires possibles vers la carboneutralité. Nous avons simulé plus de 60 scénarios différents, chacun comportant sa propre combinaison de facteurs et de résultats (voir l'annexe 2). Aucun des scénarios ne tient lieu de prédiction; ils servent plutôt à illustrer toutes les trajectoires économiques possibles en fonction de diverses conditions, hypothèses et décisions. Nous avons consulté des experts et procédé à une analyse de la documentation pour cerner les variables et les conditions susceptibles d'avoir une grande influence sur la transition du Canada, que nous pouvions faire varier d'un scénario de modélisation à l'autre dans gTech. Pour chaque scénario, nous avons utilisé le modèle pour trouver la trajectoire économique la plus rentable vers la carboneutralité dans des conditions et des hypothèses particulières. Nous avons défini des scénarios pour étudier les principaux facteurs sur lesquels le Canada peut agir de même que ceux qui échappent à son contrôle. En voici quelques-uns :

- ▶ L'évolution du coût des véhicules électriques;
- ▶ Le coût de l'hydrogène et le taux de mélange;
- ▶ Le coût de nouvelles capacités de production d'électricité propre et fiable (voir l'encadré 11);

- ▶ Les politiques climatiques d'autres grands pays;
- ▶ La disponibilité de solutions techniques à émissions négatives (voir l'encadré 4);
- ▶ Les cours mondiaux du pétrole;
- ▶ La possibilité du captage, de l'utilisation et du stockage du carbone (CUSC) de flux gazeux non concentrés;
- ▶ La disponibilité des biocarburants de deuxième génération;
- ▶ La présence de mesures de protection de la concurrence dans les politiques climatiques canadiennes;
- ▶ Le degré d'amélioration de l'intensité des émissions générées par l'exploitation de sables bitumineux.

Nous avons toutefois limité nos scénarios aux conditions cohérentes à l'interne (c.-à-d. non basées sur des hypothèses incohérentes les unes avec les autres). À titre d'exemple, nous n'avons pas évalué de scénario dans lequel les autres pays accusent du retard par rapport au Canada dans leurs politiques climatiques, mais où les cours mondiaux du pétrole sont bas et où les formes d'ingénierie de technologies à émissions négatives sont disponibles. Un prix mondial du pétrole peu élevé ne serait pas cohérent avec les deux autres facteurs, qui stimuleraient tous deux la demande de combustible fossile (et en feraient augmenter le prix).

Cet éventail de scénarios nous a servi à évaluer l'étendue de l'incertitude. Plutôt que de faire état ici des résultats de chaque scénario et trajectoire, nous avons analysé l'éventail de possibilités offertes dans tous les scénarios. Les figures du rapport comportent des bandes de résultats illustrant l'étendue des possibilités. Cette approche nous a permis de mesurer les similitudes et les différences en fonction de diverses hypothèses et conditions, et c'est ce qui différencie notre étude des autres analyses de modélisation au Canada.

Nous avons évalué la faisabilité relative, et non la probabilité relative, de scénarios possibles. Nous avons analysé un large éventail de trajectoires théoriquement possibles pour comprendre leurs répercussions potentielles. Définir les hypothèses nécessaires pour réaliser divers scénarios nous a permis de distinguer les obstacles potentiels à leur émergence et la possibilité (ou non) de les surmonter.



Dans cette section, nous présentons d'abord des observations générales concernant la faisabilité de la transition du Canada vers la carboneutralité d'ici 2050. Nous examinons ensuite les effets de cette transition sur l'utilisation de différents types d'énergie au pays.

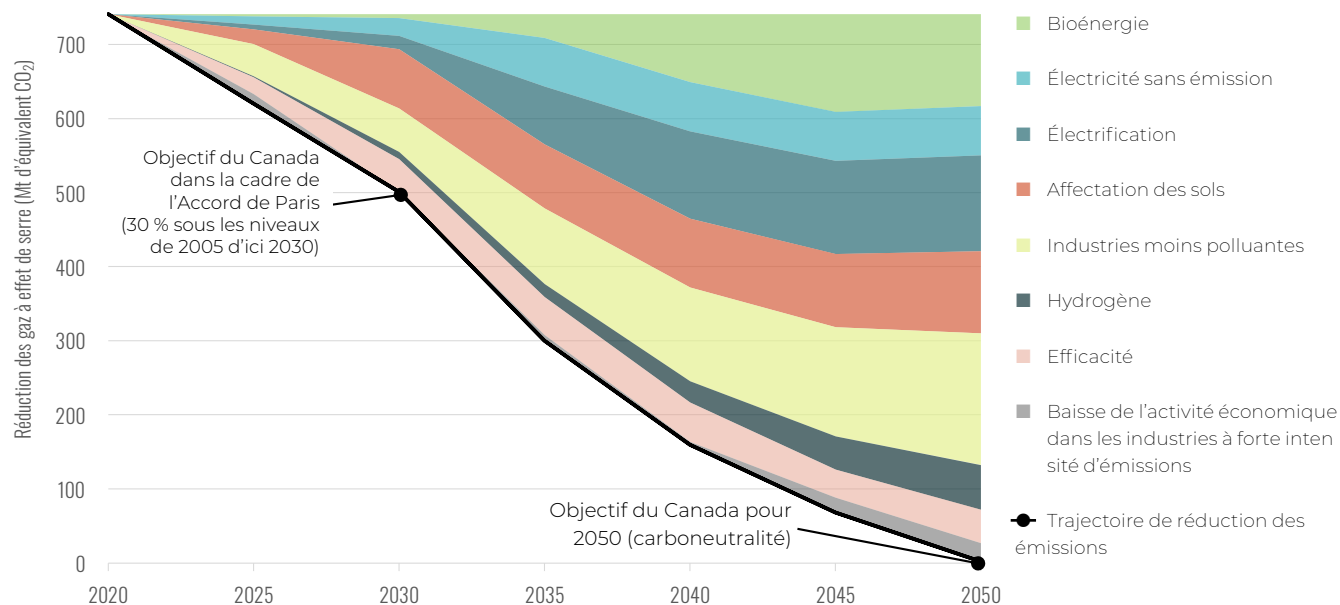
3.1 LA FAISABILITÉ DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE AU CANADA

Notre analyse est sans équivoque : l'objectif de carboneutralité du Canada est atteignable et il existe plusieurs trajectoires permettant d'y parvenir. Chaque scénario envisagé — qui mène, d'une façon ou d'une autre, à l'atteinte de cet objectif d'ici 2050 — table sur une combinaison de solutions de réduction des émissions utilisées à divers degrés selon des résultats, des hypothèses et des conditions particulières. Certaines solutions s'appuient sur des technologies déjà commercialisées (et dont le prix continuera de baisser avec le temps). D'autres nécessitent des percées significatives ou le déploiement commercial de technologies encore émergentes. Tous nos scénarios intègrent des projections de coût et de disponibilité crédibles concernant les solutions de réduction des émissions actuelles et potentielles, de même que des éléments d'incertitude s'il y a lieu. Ils constituent donc tous des avenues possibles. Ainsi, même si l'émergence

de certaines conditions ou de certains résultats pourrait compromettre la viabilité de certains scénarios, il existe assez de voies vers la carboneutralité pour nous permettre d'affirmer que l'objectif est atteignable.

La figure 1 illustre l'une des trajectoires économiques potentielles de notre modèle menant à l'atteinte de la carboneutralité au Canada. Ce scénario suppose que le coût de certaines technologies prometteuses est à la limite supérieure de la fourchette de prévisions, que d'autres grands pays ralentissent la progression du Canada vers la carboneutralité et que les solutions d'ingénierie à émissions négatives s'avèrent difficiles à rentabiliser et à reproduire à grande échelle. Comme on peut le constater dans la figure, cette trajectoire repose sur une combinaison précise de solutions (abordées en détail dans les sections 4 et 5). Tous les scénarios de notre modélisation représentent différentes trajectoires économiques qui combinent des solutions possibles de différentes façons, selon un mélange de conditions et d'hypothèses propre à chaque scénario. Dans les autres figures de la présente section et des sections 4 et 5, nous examinerons l'ensemble des résultats obtenus dans tous les scénarios plutôt que d'observer les résultats d'un seul scénario comme nous le faisons ici.

Figure 1 : L'une des nombreuses trajectoires menant à la carboneutralité au Canada d'ici 2050



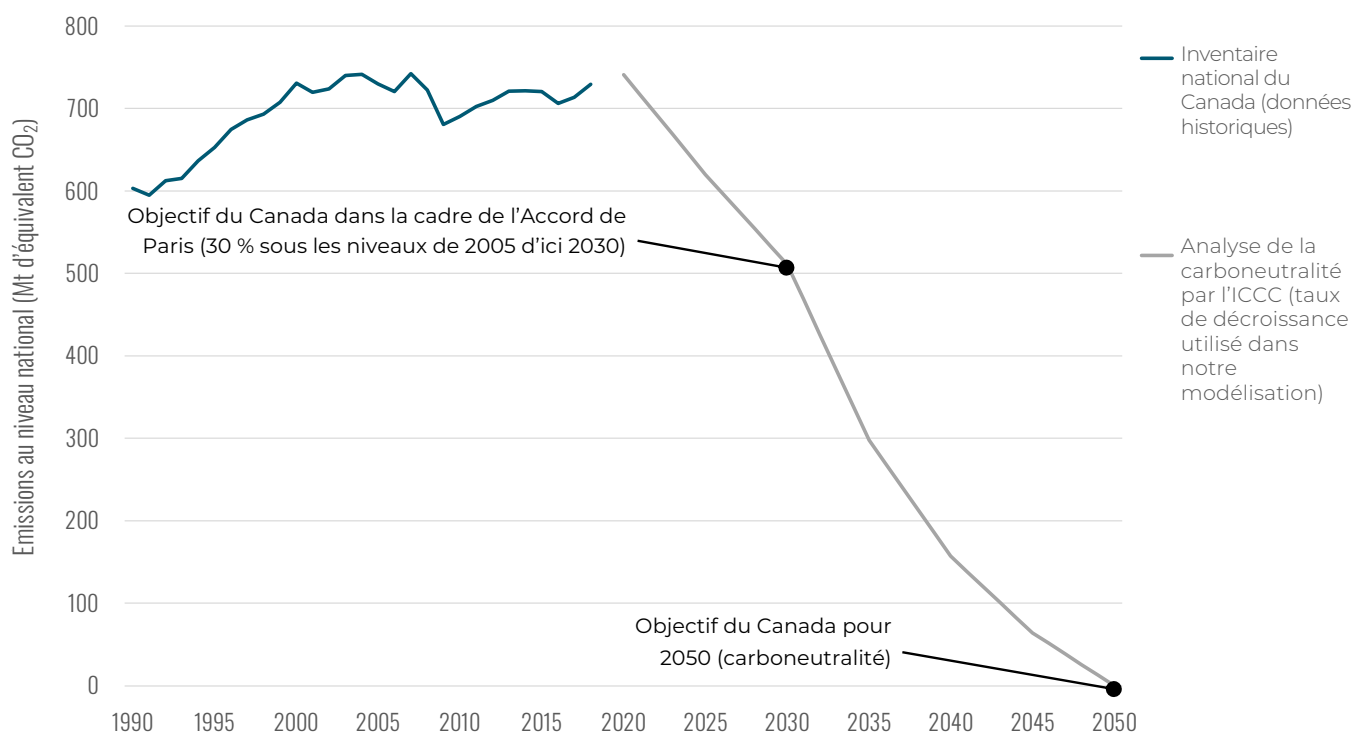
Cette figure montre un seul des scénarios étudiés dans notre modélisation. Comme on peut le voir, les émissions globales du Canada diminuent au fil du temps : le pays atteint l'objectif de l'accord de Paris en 2030 et son objectif de carboneutralité en 2050 (c'est le cas dans tous nos scénarios). Les tranches colorées illustrent le degré de contribution des différentes solutions utilisées. Cette combinaison de solutions constitue la trajectoire la plus rentable vers la carboneutralité (selon notre modélisation) en fonction des conditions, des résultats et des hypothèses utilisés. Pour en savoir plus sur les hypothèses utilisées dans ce scénario en particulier, voir le scénario 14 à l'annexe 2.

Ce n'est pas parce qu'il existe une multiplicité de trajectoires possibles qu'il sera facile d'emprunter l'une d'entre elles. Peu importe la trajectoire choisie, l'atteinte de la carboneutralité au Canada sera une entreprise complexe et ambitieuse nécessitant des efforts suivis et coordonnés sur plusieurs fronts. Il s'agit d'un vaste projet : baisse de coûts d'importantes solutions de réduction des émissions, amélioration de technologies à leurs premiers stades de développement, et adoption et déploiement à grande échelle. Les décideurs canadiens auront certainement de l'aide : les innovations en cours dans le secteur privé, les initiatives individuelles des ménages et des entreprises et les efforts à l'international contribueront certainement à la viabilité de plusieurs solutions d'importance. Mais au bout du

compte, le succès de la transition repose sur des politiques gouvernementales d'une rigueur et d'une efficacité sans précédent.

La comparaison entre les données historiques sur les émissions au Canada et la trajectoire vers la carboneutralité illustre l'ampleur de la tâche qui nous attend. Le nouveau plan climatique fédéral, s'il est bien mis en œuvre, placera le Canada sur la bonne voie afin qu'il atteigne son objectif de 2030. Cependant, comme l'indique la figure 2, après 2030, le Canada devra continuer à diminuer ses émissions pour parvenir à la carboneutralité; il lui faudra se donner des politiques fermes afin d'atteindre cet objectif en 2050.

Figure 2 : Comparaison entre les données historiques d'émissions de GES et la trajectoire vers la carboneutralité



Les données historiques sur les émissions canadiennes sont basées sur le dernier inventaire national disponible (ECCC, 2019a). La trajectoire analysée vers la carboneutralité de 2020 à 2050 montre la trajectoire d'émissions modélisée dans notre analyse et révèle l'ampleur de la réduction d'émissions nécessaire pour atteindre ces objectifs par rapport aux réductions historiques.



3.2 COMMENT NOUS UTILISONS ET PRODUISONS DE L'ÉNERGIE DANS UN CANADA CARBONEUTRE

L'énergie fait partie intégrante du quotidien au Canada. Tout objectif de carboneutralité se cristallise donc nécessairement autour de la recherche de moyens d'en produire et d'en utiliser sans générer d'émissions. Le bouquet énergétique canadien — qui sert actuellement au fonctionnement des véhicules, au chauffage des résidences, à l'alimentation en électricité résidentielle et commerciale, à la production industrielle — est généralement abordable, fiable et généré de manière sécuritaire. Or il s'agit aussi du plus grand émetteur au Canada. En effet, à l'échelle nationale, la production et la consommation d'énergie génèrent 616 millions de tonnes d'équivalent CO₂ (Mt d'éq. CO₂), soit 83 % des émissions totales au pays. Comme cette énergie est utilisée dans plusieurs secteurs (voir l'annexe 3 pour une répartition des émissions par secteur), la trajectoire énergétique du Canada vers la carboneutralité est d'une importance capitale.

Notre analyse révèle que plusieurs changements nécessaires dans la consommation d'énergie au Canada se recoupent entre les trajectoires économiques que nous avons envisagées. Ainsi, peu importe les facteurs en jeu,

l'atteinte de la carboneutralité passe par davantage d'efficacité énergétique et de conservation d'énergie, de même que des changements significatifs dans la façon dont l'énergie est produite et consommée au Canada.

Dans l'analyse ci-dessous, nous nous concentrons sur la consommation finale d'énergie sous sa forme définitive, soit l'énergie utilisée par le consommateur final pour le transport, le chauffage ou l'éclairage. Elle tient compte des formes primaires et secondaires d'énergie. « Primaire » renvoie à une source d'énergie non transformée (p. ex., le gaz naturel brut), tandis que « secondaire » ou « vecteur énergétique » renvoie à des formes d'énergie dérivées de sources primaires (p. ex., l'électricité provenant de l'énergie solaire ou éolienne). Les formes d'énergie secondaires sont carboneutres seulement si elles sont produites de façon à ne pas émettre de GES. Dans un système carboneutre, toutes les émissions canadiennes restantes résultant de la consommation d'énergie de source primaire ou secondaire doivent être compensées. Par exemple, pour s'inscrire dans une trajectoire carboneutre, la production d'électricité à partir de gaz naturel doit être entièrement assortie de dispositifs de captage, d'utilisation et de stockage du carbone (CUSC) ou être compensée ailleurs dans le système.

Augmentation de la consommation d'énergie propre dans toutes les trajectoires étudiées

Dans tous les scénarios de carboneutralité que nous avons étudiés, les sources primaires d'énergie propre occupent une part croissante. En ce qui a trait à l'utilisation finale, trois vecteurs énergétiques non émetteurs prennent de l'importance : l'électricité⁹ l'hydrogène¹⁰ et les biocarburants¹¹ (forme gazeuse ou liquide).

Selon notre analyse, à moins d'avancées technologiques précises (et incertaines), la part de combustibles fossiles utilisés pour la production d'énergie est appelée à baisser considérablement dans la trajectoire vers la carboneutralité. Nous avons constaté que si les solutions techniques à émissions négatives et les technologies avancées de CUSC s'avéraient à la fois rentables et reproduct-



Dans tous les scénarios de carboneutralité, l'électricité, l'hydrogène et les biocarburants jouent un rôle de plus en plus important.

ibles à grande échelle, les combustibles fossiles pourraient continuer de fournir une bonne partie de la consommation d'énergie finale et cette proportion pourrait même augmenter. Toutefois, cette avenue demeure fort incertaine et pour y parvenir, il resterait de nombreux obstacles à surmonter dont certains ne relèvent pas du Canada. (Nous traitons en détail de nos conclusions concernant l'utilisation de combustibles fossiles au Canada plus loin.)

La figure 3 illustre une fourchette des prévisions de la contribution de diverses sources et de divers vecteurs énergétiques à la demande finale d'énergie dans la voie vers la carboneutralité¹². Bien que la contribution des trois principaux vecteurs d'énergie propre au bouquet énergétique du Canada s'intensifie avec le temps dans toutes les trajectoires analysées, nous avons constaté que l'apport de chacun varie d'un scénario à l'autre (une plus grande utilisation d'un vecteur provoquant une diminution de l'utilisation d'autres vecteurs). Les différences constatées proviennent des diverses évolutions de coût des principales technologies énergétiques ainsi que de nos diverses hypothèses concernant l'efficacité de technologies émergentes. Pour certains vecteurs énergétiques, une croissance significative nécessite l'avancée de technologies qui ne sont pas encore commercialement rentables ou reproductibles à grande échelle, comme l'indique la figure. D'autres — surtout l'électricité propre — s'appuient principalement sur des technologies qui sont déjà sur le marché.

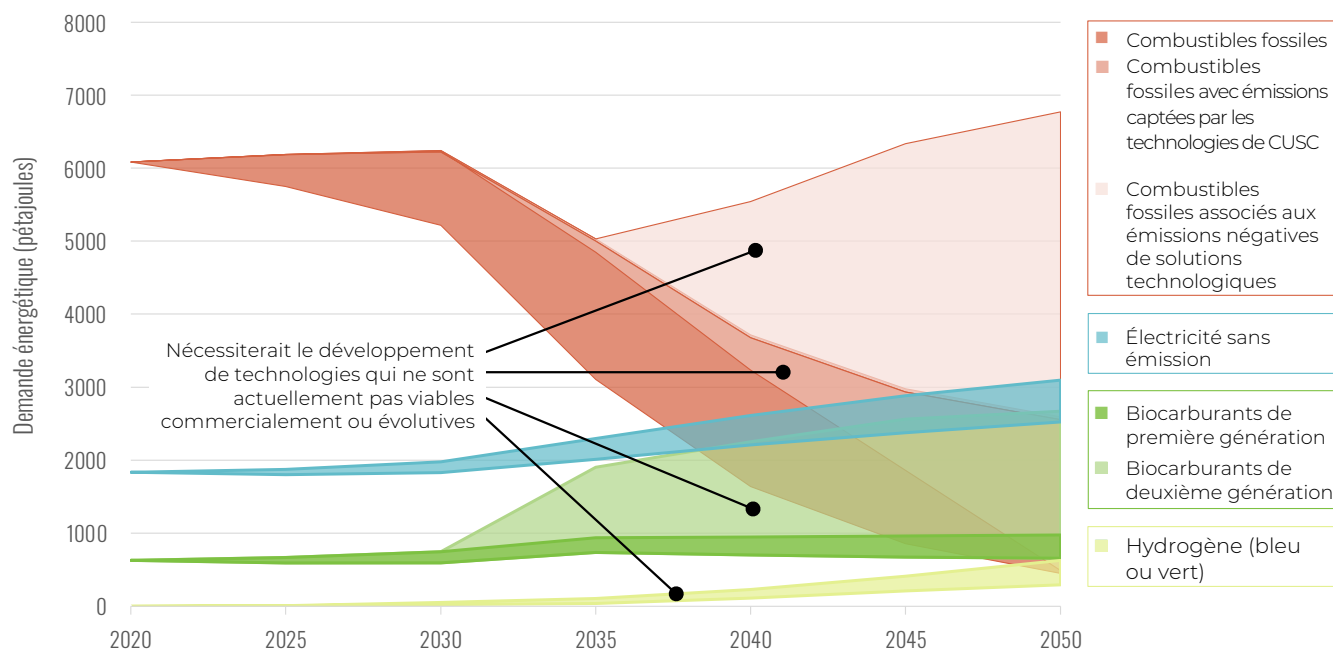
9 L'électricité propre peut être d'origine hydroélectrique, nucléaire, éolienne, solaire, géothermique; elle peut également provenir de biocarburants, ou bien de technologies émergentes comme l'énergie marémotrice, les petits réacteurs modulaires et les combustibles fossiles accompagnés de dispositifs de CUSC. Pour que ces solutions s'inscrivent dans une démarche de carboneutralité, les émissions restantes (dans certains cas, jusqu'à 10 % des émissions ne sont pas captées par les CUSC) doivent être compensées.

10 L'hydrogène carboneutre est produit à partir de matières biologiques comme de l'eau et du gaz naturel au moyen d'un arsenal de technologies : électrolyse avec de l'électricité propre (hydrogène vert), combinaison de reformage de méthane ou de reformage autothermique avec CUSC (hydrogène bleu), ou d'autres technologies non incluses dans le modèle comme la pyrolyse du méthane ou la gazéification directe dans les réservoirs de pétrole et de gaz.

11 Les biocarburants comprennent les carburants renouvelables sous forme liquide (éthanol produit à partir de maïs, biodiesel produit à partir d'huile végétale) de même que les carburants sous forme gazeuse comme le gaz naturel renouvelable (GNR) produit à partir de déchets animaux et le méthane de dépotoirs (ou des technologies utilisant d'autres types de biomasse qui ne sont pas encore commercialisées). Ils peuvent également comprendre la combustion directe de biomasse (p.ex., feu de bois).

12 Certains des grands écarts observés dans la figure s'expliquent par des différences entre la quantité totale d'énergie requise dans les différents scénarios, qui peut varier selon les hypothèses de coûts. Notre modèle tient compte de ces données et exprime plutôt la proportion de la contribution des vecteurs énergétiques à la demande finale d'énergie. Ainsi, d'ici 2050, l'électricité pourrait fournir de 28 % à 55 % de la demande en énergie finale, l'hydrogène, de 3 % à 10 % et les biocarburants, de 7 % à 44 %.

Figure 3 : Contribution de diverses sources et divers vecteurs énergétiques à la demande finale d'énergie canadienne dans les trajectoires vers la carboneutralité



Cette figure (et les suivantes) présente les résultats de plus de 60 scénarios. Les bandes représentent la fourchette de valeurs de l'apport de divers vecteurs et de diverses sources d'énergie (hydrogène, électricité, biocarburants et combustible fossile) à la demande finale d'énergie au Canada dans les trajectoires économiques projetées dans notre modélisation. La fourchette représente les différentes possibilités générées par les quelque 60 scénarios de modélisation que nous avons analysés. En ce sens, l'étendue des résultats illustre l'incertitude entourant les trajectoires, laquelle fait partie des critères de sélection des scénarios (voir l'encadré 2).

Chaque scénario pris individuellement comporte des tendances comprises dans chacune des fourchettes de la figure. Il est possible d'additionner les résultats par scénario pour exprimer l'utilisation totale d'énergie; en revanche, il n'est pas possible d'additionner les fourchettes entre elles, car une consommation accrue d'une source d'énergie provoque souvent une baisse de consommation d'une autre source d'énergie. Il existe notamment une corrélation entre la consommation élevée de biocarburants et la baisse de l'utilisation de combustibles fossiles.

Le fait de montrer les fourchettes de ce graphique (et des suivants) dans toute leur amplitude ne signifie pas que tous les résultats sont également probables. Ainsi, certaines parties de ce graphique comportent de grandes incertitudes. La partie supérieure des fourchettes des biocarburants et des combustibles fossiles, notamment, correspond à des situations où des technologies se développent, même si elles ne sont pas reproductibles à grande échelle ou offertes sur le marché présentement. Pour utiliser davantage de biocarburants d'ici 2050, par exemple, il faudrait que l'utilisation de biocarburants de deuxième génération, produits à partir de matières biologiques comme du panic érigé ou des résidus de bois, se révèle rentable à grande échelle.

Comme notre modèle ne rend pas entièrement compte de certaines trajectoires à forte demande en électricité et en hydrogène, nous avons peut-être sous-estimé leur apport potentiel à la demande d'énergie finale. À titre d'exemple, le modèle ne tient pas compte du potentiel recelé par de nouvelles connexions interprovinciales dans le réseau électrique. De la même façon, il prévoit seulement l'in-

tégration d'hydrogène dans les gazoducs plutôt que son transport dans des hydrogénoducs conçus à cette fin. Et comme le modèle n'inclut pas la tarification différenciée dans le temps dans les marchés de l'électricité, il ne peut pas rendre compte de la complémentarité possible entre électricité et hydrogène; c'est-à-dire l'utilisation de l'énergie excédentaire produite par les sources d'électricité renouvelables

intermittentes pour produire de l'hydrogène, lequel pourrait à son tour servir à compenser les baisses de productivité de ces sources intermittentes.

D'autres études ont identifié une fonction de l'électricité et de l'hydrogène qui correspond à la plus haute extrémité de la fourchette de nos projections pour leur demande en 2050 (figure 3). À titre d'exemple, en 2016, une étude du Projet Trottier pour l'avenir énergétique a conclu que l'utilisation d'hydrogène passerait de presque 0 aujourd'hui à 621 pétajoules (PJ) d'ici 2050, tandis que nos scénarios prévoient qu'elle atteindra entre 294 et 628 PJ d'ici 2050 (Projet Trottier pour l'avenir énergétique, 2016). De plus, selon le rapport *Pathways to Deep Decarbonization in Canada*, en 2050, l'électricité pourrait représenter près de la moitié (43 %) de la consommation d'énergie finale totale, tandis que notre analyse situe cette proportion entre 28 et 55 % (Bataille et coll., 2015). Selon d'autres études, comme "Perspectives énergétiques canadiennes 2018", cette proportion serait encore plus grande : elle s'élèverait à 66 % de la consommation d'énergie finale d'ici 2050 pour atteindre même le moins contraignant des scénarios de réduction (Langlois-Bertrand et coll., 2018).

La concrétisation d'un de ces futurs énergétiques potentiels n'est pas une mince tâche. Pour chaque vecteur énergétique évalué, une croissance significative nécessiterait la mise en œuvre de politiques gouvernementales strictes, des investissements massifs et l'élimination de nombreux obstacles. Nous traitons de ces défis en profondeur à la section 5, mais en voici quelques exemples.

- **Électricité** : Pour construire les infrastructures et développer la capacité de production nécessaire pour répondre à la demande potentielle indiquée, il faudra mettre en œuvre un grand nombre de projets et en développer constamment de nou-

veaux, ce qui implique généralement des processus complexes d'évaluation et de consultation environnementales. Les réseaux, leur exploitation et l'électricité complémentaire sur demande devront également évoluer de manière importante pour soutenir cette croissance (voir l'encadré 3).

- **Hydrogène** : Une baisse des coûts de production et de distribution de l'hydrogène ainsi que des coûts de technologies d'utilisateur final (comme les piles à combustible) sera nécessaire. Pour la plupart des utilisations industrielles, l'hydrogène pourra être produit et stocké près de son lieu d'utilisation, mais pour son emploi comme carburant dans le transport de marchandises il faudra créer un réseau de ravitaillement le long des routes principales. Pour pouvoir utiliser l'hydrogène à plus grande échelle et de façon moins centralisée, le Canada devra construire des pipelines de transport, élaborer des normes concernant les réseaux et les technologies fonctionnant au gaz (p. ex., chaudières et cuisinières) et moderniser ces réseaux et technologies pour qu'ils puissent recueillir un mélange comportant davantage d'hydrogène.
- **Biocarburants** : Pour que se produise une augmentation significative de l'utilisation des biocarburants de deuxième génération produits à partir de différentes matières biologiques (p. ex., gaz naturel renouvelable [GNR] provenant de résidus de bois), cette technologie encore émergente devra s'avérer à la fois techniquement et commercialement viable (voir la figure 3). Il faudra également consacrer une grande partie des territoires à la production de matière organique, ce qui pourrait avoir des répercussions sur la sécurité alimentaire, la biodiversité locale et les droits des Autochtones.

ENCADRÉ 3



Des réseaux électriques intelligents pour préparer le Canada à la carboneutralité

La transition carboneutre pose plusieurs défis pour les infrastructures électriques vieillissantes du Canada. En effet, l'ajout de sources d'électricité intermittentes, comme l'éolien et le solaire, pourrait compliquer la stabilisation des échanges d'énergie sur le réseau. Les sources d'énergie renouvelables, souvent moins centralisées et de plus petite envergure, rendront également le futur marché de l'électricité plus dynamique et local. Au même moment, une hausse de la demande de nouvelles technologies comme les véhicules électriques et les thermopompes rajoutera de la pression sur la capacité du réseau, ce qui nécessitera une meilleure gestion de la demande et une optimisation du système.

Les réseaux intelligents peuvent aplanir ces difficultés et mieux préparer les réseaux électriques du Canada à une économie carboneutre.

Un réseau intelligent, c'est un ensemble intégré de technologies, d'équipements et de commandes qui communiquent et améliorent la fiabilité, la sécurité et l'efficacité de la distribution d'électricité (U.S. Department of Energy, 2020). Les technologies intelligentes permettant la modernisation du réseau touchent l'entièreté de la chaîne d'approvisionnement du réseau d'électricité : production, transport, distribution et consommation. Infrastructures de mesurage avancées, meilleur réglage de la tension, ressources énergétiques décentralisées, stockage d'énergie, réseaux avec rétablissement automatisé et microréseaux... Les technologies émergentes peuvent nous aider à concevoir un système plus intelligent et plus efficace basé sur des données en temps réel fournies par des capteurs, l'intelligence artificielle et des logiciels d'analytique (AIE, 2011).

Mais malgré le fait que les technologies de réseaux intelligents soient essentielles pour suivre le rythme de l'évolution du système énergétique et des besoins en électricité, plusieurs obstacles entravent leur développement et leur déploiement au Canada.

Le principal obstacle réside peut-être dans le cadre réglementaire rigide et descendant. Bien des réseaux électriques provinciaux ont été conçus pour le 20^e siècle, époque où la centralisa-

tion de la production, du transport et de la distribution d'électricité allait de soi. Résultat? Des réseaux souvent fortement réglementés, exploités par un fournisseur unique et laissant peu de place à la concurrence, à l'innovation et à l'entrepreneuriat. Pour créer les conditions propices à l'adoption de nouvelles technologies dans le réseau, à la satisfaction de la demande à venir et à l'adaptation à un système énergétique de plus en plus complexe, il faut se doter d'une réglementation plus efficace. Ajoutons qu'avec l'augmentation de la demande en électricité et la diminution de la demande en gaz à prévoir d'ici 2050, la réglementation des réseaux de ces deux formes d'énergie sera nécessairement à revoir.

La modernisation du réseau électrique aura aussi un coût non négligeable. Selon l'AIE (2020a), dans un scénario de carboneutralité mondiale d'ici 2050, les infrastructures liées à l'électricité compteront pour une bonne part des dépenses en capital cumulatives. Ces dépenses se chiffrent notamment à environ 13 billions de dollars (CAD) pour la modernisation et l'extension des réseaux électriques et à environ 4,1 billions de dollars (CAD) pour le stockage d'énergie entre 2020 et 2070.

Ces coûts se répercuteront sur les tarifs d'électricité pour les particuliers et les entreprises au pays. D'une part, la modernisation des infrastructures du réseau pourrait faire grimper les tarifs, ce qui est particulièrement problématique pour les ménages à faible revenu, qui consacrent déjà une part disproportionnée de leurs revenus à l'électricité. D'autre part, la baisse continue du coût des énergies renouvelables pourrait réduire les coûts de production d'électricité, et les gains d'efficacité générés par la gestion de la demande pourraient permettre aux fournisseurs d'électricité de faire diminuer les charges de pointe coûteuses. Le coût final de cette modernisation — et la distribution de ce coût — dépendra du contexte de chaque région et province. Notre analyse révèle toutefois que les ménages canadiens, en moyenne, verront la part de leur revenu consacrée à l'énergie baisser dans une transition vers la carboneutralité (voir l'encadré 5).

Enfin, la modernisation du réseau d'électricité nécessitera également un renouvellement des compétences et des connaissances de la main-d'œuvre. Tout en ouvrant de nouvelles possibilités aux travailleurs, la transition se révélera en outre possiblement complexe, puisque d'autres secteurs auront aussi besoin de recruter des travailleurs qualifiés.

Les retombées potentielles des technologies de réseaux intelligents sont énormes, mais des difficultés majeures entravent leur adoption à grande échelle. Une fois ces difficultés surmontées, non seulement la création d'un réseau d'électricité moderne faciliterait la transition carboneutre du Canada, mais elle ouvrirait aussi toutes grandes les portes à l'exportation dans le monde entier et positionnerait les entreprises canadiennes comme des fournisseurs de technologies et de connaissances sur les réseaux intelligents.

L'utilisation de combustibles fossiles devrait diminuer sans innovations technologiques substantielles

Dans la plupart des scénarios étudiés, la consommation de combustibles fossiles au Canada chute progressivement. En effet, les changements prévus par notre modèle vont d'une croissance de 3 % à une diminution de 14 % en 2030 par rapport à aujourd'hui (voir la figure 3). (Ces chiffres se rapportent à la consommation nationale de combustibles fossiles; nous traitons de l'avenir de leur production au Canada à la section 4.3.)

Cette baisse marquée s'explique d'abord par une meilleure efficacité énergétique, puis par le remplacement des combustibles fossiles par d'autres types d'énergie. Selon les projections, d'ici 2050, la consommation restante sera circonscrite principalement à des secteurs où il n'existe pas de solutions de rechange viables ou à des secteurs où le stock de capital de grande valeur a une très longue durée de vie, comme les usines de produits chimiques. Les émissions engendrées par la combustion de ces combustibles fossiles restants devront être soit captées à la source, soit compensées par des solutions à émissions négatives.

C'est seulement dans les scénarios où des solutions à émissions négatives comme la captation atmosphérique directe et les types avancés de CUSC se révèlent à la fois rentables et reproductibles à grande échelle que notre analyse prévoit une chute moins marquée de la consommation de combustibles fossiles (voir l'encadré 4 pour une explication des différents types de solutions à émissions négatives). Dans les scénarios où nous partons du principe que ces technologies encore émergentes et incertaines

sont viables, notre modèle prévoit une consommation de combustibles fossiles au Canada qui pourrait varier grandement, soit d'une diminution de 10 % à une augmentation de 22 % d'ici 2050.

Il subsiste une très grande incertitude entourant la place potentielle des combustibles fossiles dans un avenir carboneutre au Canada. Actuellement, les solutions techniques à émissions négatives et les types avancés de CUSC en sont seulement aux stades de développement et de démonstration, mais ces ils pourraient devenir viables si le juste équilibre est trouvé entre améliorations technologiques, économies d'échelle et évolution des politiques. Toutefois, même dans ces conditions, pour surmonter les nombreux obstacles (particulièrement dans le cas des solutions à émissions négatives), des mesures s'imposent : importantes baisses de coût, construction massive d'usines et d'infrastructures, reconnaissance des systèmes mondiaux de comptabilisation des GES et atténuation des réticences potentielles de la population. En plus, le déploiement de ces solutions doit se faire dans la reconnaissance et le respect des droits autochtones. Les choix politiques et les investissements canadiens peuvent favoriser la viabilité de ces solutions, mais le résultat final demeure incertain. (Il y a aussi le risque, que nous aborderons plus loin, que leur viabilité potentielle retarde d'autres mesures et investissements qui, dans l'éventualité où ces solutions ne fonctionneraient finalement pas, deviendraient plus chers à mettre en place.) De plus, même s'il existe une façon de rendre viables les solutions techniques à émissions négatives, il reste à savoir si elles ne devraient pas être mises en réserve pour fournir les émissions nettes négatives qui seront probablement nécessaires plus tard dans le siècle (GIEC, 2018). Nous y reviendrons à la section 5.

ENCADRÉ 4



Projet pilote de capture atmosphérique directe de Carbon Engineering à Squamish, en Colombie-Britannique (Skwxwú7mesh-ulh Temíxw).

Comprendre les solutions à émissions négatives

De manière générale, il existe deux façons de générer des « émissions négatives ». La première consiste à recourir à des processus naturels pour stocker les GES dans le sol ou dans les végétaux; la seconde, à utiliser de nouvelles technologies pour retirer les GES de l'atmosphère et les enfouir sous terre ou les incorporer dans de nouveaux produits ou matériaux. Il s'agit de deux techniques permettant de compenser des émissions générées physiquement ailleurs plutôt que de les réduire ou de les capter à la source.

La nature est dotée d'une panoplie d'outils capables de générer des émissions négatives. Ainsi, il est possible d'aménager les forêts pour qu'elles retiennent davantage de carbone en changeant les pratiques d'aménagement forestier, en améliorant les pratiques de conservation ou en plantant des arbres. Il existe aussi tout un arsenal de techniques agricoles faisant en sorte que les terres captent davantage de carbone : semis direct, enrichissement des sols par culture de couverture, meilleure utilisation des résidus de culture, plantation d'arbres sur des terres agricoles... Les pratiques d'aménagement des prairies et des milieux humides, surtout la restauration et la protection visant à éviter leur détournement à d'autres fins comme l'agriculture, permettent également de séquestrer le carbone. Pour ce qui est des océans, la culture d'algues ou la restauration d'écosystèmes côtiers (y compris les marais salés) peuvent en faire de meilleurs puits de carbone. Toutefois, tous ces gains d'émissions négatives ne sont valables que si le

carbone reste séquestré, ce qui n'est pas le cas lorsque des perturbations d'origine naturelle ou humaine — les feux incontrôlés ou l'exploitation forestière, par exemple — libèrent le carbone séquestré.

On peut également utiliser la technologie pour générer des émissions négatives. De nouvelles technologies en développement permettraient de capter le CO₂ dans l'atmosphère et de le séquestrer sous terre ou de l'emprisonner dans des matériaux industriels. La captation atmosphérique directe (développée notamment par Carbon Engineering, une entreprise canadienne qui réalise un projet pilote en Colombie-Britannique) consiste à extraire le CO₂ directement de l'air par une série de réactions chimiques, à expulser de l'air sans carbone et à générer du CO₂ purifié, qui peut ensuite être pompé sous terre au moyen d'une technologie de CUSC, ou servir à produire des matériaux comme de la fibre de carbone et du béton. Des projets pilotes de CUSC sont déjà en marche à plusieurs endroits dans le monde, notamment à l'installation Quest de Shell en Alberta. Une autre technologie émergente actuellement testée dans une usine de charbon au Royaume-Uni, la bioénergie avec captage et stockage du carbone (BECSC), consiste à brûler de la biomasse pour obtenir de l'énergie, puis à capter les émissions ainsi générées et à les séquestrer sous terre. Les technologies de BECSC, qui utilisent le carbone emprisonné par les végétaux et le captent à nouveau par combustion, représentent une version hybride des solutions techniques et naturelles à émissions négatives. Il existe d'autres solutions hybrides possibles : pensons à l'altération forcée, qui consiste à broyer et à étendre sur les sols certains types de minéraux (p. ex., olivine ou béton utilisé) pour qu'ils absorbent le CO₂ de l'air.

Les formes techniques de solutions à émissions négatives en sont tout au plus au stade de démonstration et leur rôle dans les efforts du Canada pour atteindre la carboneutralité demeure incertain. L'incertitude concerne d'une part la rentabilité finale et la reproductibilité à grande échelle de ces technologies, et d'autre part la façon dont elles seront reconnues dans le système mondial de comptabilisation des GES (Vivid Economics, 2020). Si elles s'avèrent effectivement viables, elles pourraient jouer un rôle majeur dans l'élan à la fois vers la carboneutralité mondiale et vers les émissions nettes négatives à la fin du siècle que préconisent la plupart des analyses mondiales pour éviter de graves répercussions des changements climatiques (GIEC, 2018).

L'efficacité énergétique, incontournable dans toutes nos trajectoires vers la carboneutralité

L'efficacité énergétique, souvent l'un des éléments les moins reconnus d'un plan climatique, en est pourtant un rouage essentiel. Ainsi, dans tous les scénarios étudiés, notre modèle prévoit un apport important et croissant de l'efficacité énergétique : une réduction de la demande énergétique de 9 % à 12 % d'ici 2030, et de 17 % à 36 % d'ici 2050. Ces pourcentages correspondent assez bien à l'évolution des dernières décennies (une amélioration de 19 % de 1990 à 2016 au Canada [RNCAN, 2020a]). L'amélioration constante de l'efficacité énergétique au pays dans la trajectoire vers la carboneutralité serait économique; en effet, un gain d'efficacité coûte souvent bien moins cher que la production accrue d'énergie propre. Selon notre analyse, les gains d'efficacité — aussi bien des moteurs à combustion que des bâtiments et des procédés industriels — se produiraient dans tous les secteurs de l'économie.

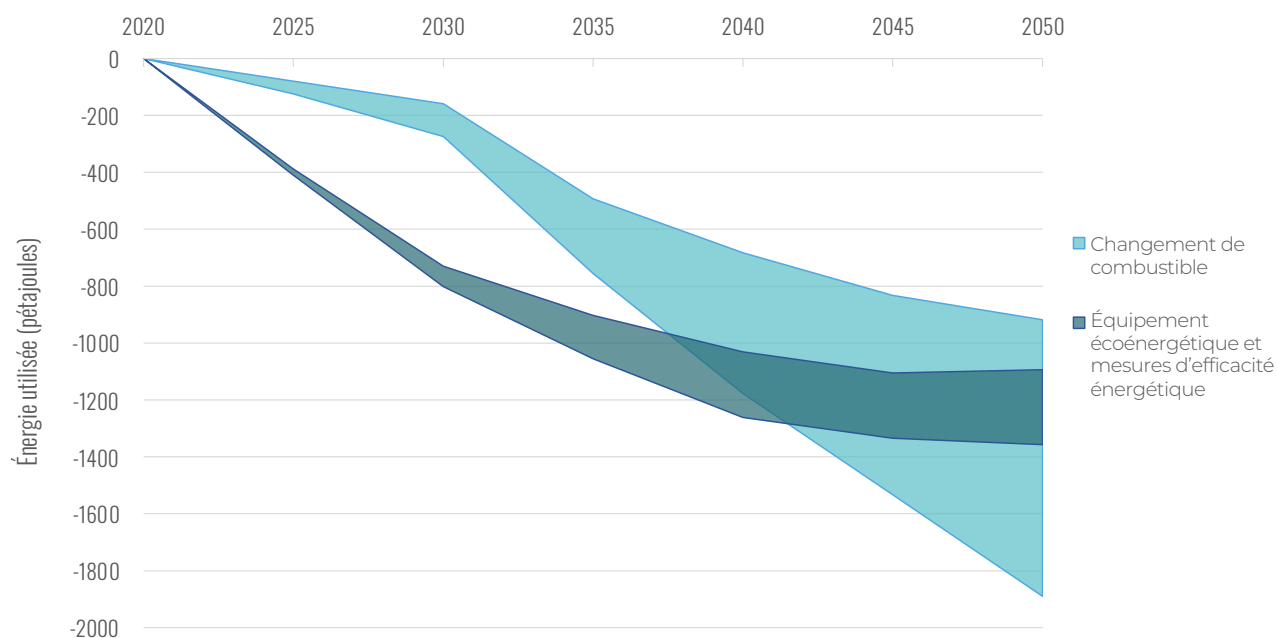
L'origine de ces gains d'efficacité changera avec le temps. Comme nous le montrons à la figure 4, dans

les 10 à 15 prochaines années, l'adoption d'équipement plus efficace et de mesures d'efficacité énergétique générera beaucoup plus d'économies que l'adoption d'équipements alimentés par divers autres carburants. La plupart des gains d'efficacité potentiels d'ici 2030 proviendraient de ces améliorations. Toutefois, à long terme, le remplacement des combustibles — l'alimentation d'équipement d'utilisation finale avec d'autres sources d'énergie que des combustibles fossiles, comme l'électricité — jouera un rôle beaucoup plus important dans la réduction à la fois de la consommation d'énergie et des émissions. En règle générale, le remplacement des combustibles par des sources d'énergie à faibles émissions améliore l'efficacité énergétique, car l'équipement fonctionnant aux combustibles liquides et gazeux a souvent un meilleur rendement thermodynamique que celui qui fonctionne aux combustibles solides. Quant à l'équipement fonctionnant à l'électricité, il est plus efficace encore. Cependant, la contribution globale du remplacement des combustibles à l'efficacité énergétique dépendra également de l'efficacité énergétique de la production de carburants.



La transition des combustibles fossiles vers des sources d'énergie propre, comme l'éolien et le solaire, aura une place centrale dans la trajectoire du Canada vers la carboneutralité. La photographie est prise sur le territoire traditionnel des Mi'kma'ki.

Figure 4 : Effets des améliorations directes de l'efficacité énergétique et du remplacement des combustibles sur la consommation d'énergie dans les trajectoires vers la carboneutralité



Cette figure illustre les effets de divers facteurs liés à l'efficacité énergétique sur les projections d'utilisation d'énergie dans nos scénarios de modélisation. L'étendue des valeurs de chaque facteur est représentative de nos estimations pour chacun, tous scénarios confondus. Ainsi, elle reflète l'incertitude associée à la trajectoire du Canada vers la carboneutralité, incertitude qui fait partie des critères de sélection des scénarios (voir l'encadré 2).



L'APPORT DE DIFFÉRENTES SOLUTIONS AUX TRAJECTOIRES DU CANADA VERS LA CARBONEUTRALITÉ

Dans cette section, nous explorons les effets sur la vie, le travail et les déplacements des Canadiens des différentes trajectoires possibles vers la carboneutralité et des solutions sur lesquelles elles s'appuient. Nous nous intéressons aux types de technologies et de solutions les plus susceptibles de faire partie de la vie lorsque la carboneutralité aura été atteinte, et à la

raison pour laquelle certaines solutions risquent d'avoir davantage de retombées. Nous décrivons aussi les occasions et les compromis associés aux différentes solutions¹³. (Pour connaître les réductions précises d'émissions projetées par notre modèle pour des solutions dans divers secteurs, consulter l'annexe 4.)

4.1 BÂTIMENTS : CHAUFFAGE DES RÉSIDENCES ET DES LIEUX DE TRAVAIL

PRINCIPALES TRAJECTOIRES VERS LA CARBONEUTRALITÉ

- L'environnement bâti du Canada peut atteindre la carboneutralité grâce aux technologies et aux mesures disponibles aujourd'hui.
- L'efficacité énergétique aurait un rôle importante à jouer, tout comme l'abandon des sources de chaleur à fortes émissions au profit de sources électriques. Lorsque l'électrification est impossible ou trop coûteuse, des gaz propres comme le gaz naturel renouvelable et l'hydrogène seraient utilisés.
- Globalement, la transition peut se faire sans augmenter les coûts énergétiques pour les ménages canadiens; en fait, la part du revenu des ménages consacrée à l'énergie pourrait

¹³ Notre modèle permet d'évaluer de nombreuses solutions technologiques et non technologiques. Pour décrire l'incidence potentielle des solutions technologiques (p. ex., petits réacteurs nucléaires modulaires, carburants de synthèse) et non technologiques (p. ex., modification de l'aménagement urbain ou changements culturels qui pourraient réduire la demande en biens et services à fortes émissions) qui ne sont pas traitées dans notre modèle, nous nous appuyons sur des revues de la littérature et l'avis d'experts.

Au Canada, nous utilisons de l'énergie dans les bâtiments pour maintenir une température confortable, faire fonctionner les électroménagers et les autres appareils utilisés au quotidien, et chauffer l'eau. À l'heure actuelle au Canada, 76 % des besoins énergétiques des bâtiments sont comblés par des combustibles fossiles, comme le gaz naturel, ou par de l'électricité générée par des combustibles fossiles (RNCan, 2020a), ce qui produit 73 millions de tonnes de GES, soit 10 % des émissions du pays. Pendant la transition vers la carboneutralité, il faudra continuer de répondre aux besoins énergétiques des Canadiens tout en offrant une gamme de solutions pouvant être utilisées dans les bâtiments aussi bien neufs qu'anciens à l'échelle nationale. Heureusement, les systèmes permettant d'atteindre la carboneutralité dans nos bâtiments sont déjà commercialisés.

Les technologies actuelles permettent d'atteindre la carboneutralité dans le secteur du bâtiment

Notre analyse révèle qu'on pourrait atteindre la carboneutralité dans l'environnement bâti canadien en utilisant

uniquement les technologies et les mesures qui existent déjà. Si de nombreux obstacles limitent l'adoption à grande échelle de beaucoup de ces solutions, ils pourraient en grande partie être surmontés grâce à des politiques gouvernementales suffisamment strictes et coordonnées. Selon nos données, au Canada, le secteur du bâtiment pourrait atteindre la carboneutralité sans recourir à des technologies à émissions négatives ou qui en sont encore à un stade précoce de développement.

Par ailleurs, bien que les technologies sobres en carbone soient plus chères à l'achat que les solutions à plus fortes émissions, à long terme beaucoup ont un coût nul, voire permettent d'économiser. Le Conseil du bâtiment durable du Canada (2019) estime que les coûts initiaux associés aux bâtiments sans émissions dépassent la moyenne actuelle de seulement 8 %, et que l'économie en énergie permet de générer un rendement net (qui inclut les coûts en capital) de 1 % en moyenne pour la durée de vie du bâtiment. Notre analyse montre que l'atteinte de la carboneutralité aurait une très faible incidence sur les dépenses énergétiques des ménages canadiens, qui pourraient même ressortir gagnants de la transition. Ces résultats sont présentés en détail à l'encadré 5.



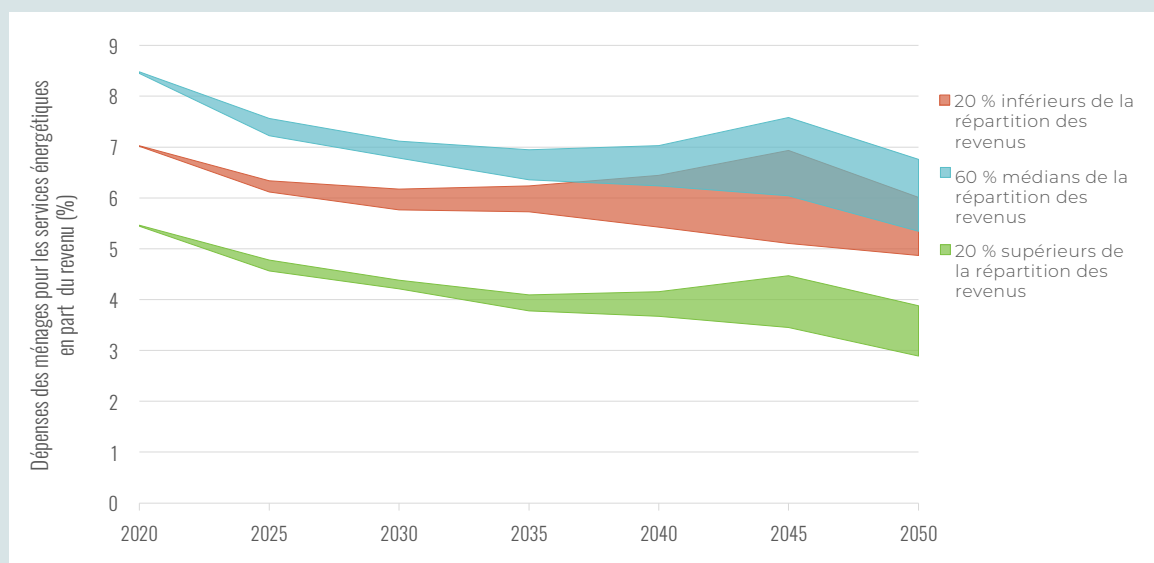
L'édifice evolv1 à Waterloo, en Ontario, est le tout premier bâtiment commercial carboneutre à énergie positive au Canada (zéro émission et production d'énergie supérieure à sa consommation). La construction de bâtiments zéro émission est centrale dans la transition du Canada vers la carboneutralité et entraînera des économies à long terme.

ENCADRÉ 5

Effets de la carboneutralité sur les dépenses énergétiques des ménages canadiens

Dans tous les scénarios analysés, le pourcentage du revenu des ménages consacré aux services énergétiques (chauffage, électricité et transport) diminue pour tous les groupes de revenu, comme le montre la figure 5.

Figure 5 : Pourcentage du revenu des ménages consacré aux services énergétiques, toutes trajectoires confondues



Les coûts énergétiques diminueraient pour les ménages de tous les groupes de revenu au fil de la transition du Canada vers la carboneutralité, jusqu'en 2050. Toutefois, les niveaux relatifs des dépenses se maintiendraient probablement. En effet, les ménages à revenu moyen consacrent une plus grande part de leur revenu aux dépenses énergétiques que les ménages à faible revenu, même si leur revenu est plus élevé, et ce, entre autres parce qu'ils sont plus nombreux à détenir des véhicules et à vivre dans de plus grandes résidences, ce qui entraîne une plus grande consommation d'énergie relative. Si l'on considère la part du revenu, ce sont les ménages les plus riches qui dépensent le moins en énergie, bien qu'ils en soient généralement les plus grands consommateurs (ils possèdent plusieurs véhicules, vivent dans de grandes résidences et prennent l'avion plus souvent), en raison de leur revenu plus important. De vastes changements sociaux dans les inégalités de revenu pourraient changer la donne. Par exemple, une inégalité accrue pourrait augmenter encore les dépenses en énergie des ménages à faible revenu, qui verraient leur revenu réduit, alors qu'elle diminuerait celles des ménages les plus riches si leur revenu augmentait. Par contre, si l'inégalité diminuait au cours des décennies à venir, la part du revenu servant à payer les coûts énergétiques pourrait se rapprocher dans les différents groupes.

Notre analyse indique que la réduction des dépenses énergétiques des ménages est associée à plusieurs facteurs :

- La croissance économique à l'échelle du pays entre 2020 et 2050 entraînerait une augmentation du revenu moyen; ainsi, même si les dépenses en énergie demeuraient stables en chiffres absolus pour certains ménages, la part du revenu dépensée en énergie serait inférieure.
- L'efficacité énergétique s'améliorerait à la grandeur de l'économie, des moteurs de voiture au chauffage des résidences, ce qui réduirait de façon importante la quantité totale d'énergie utilisée par ménage et les dépenses associées. (Les changements de comportement et de culture joueront aussi un rôle dans la transformation des tendances de consommation d'énergie; cette question est traitée à l'encadré 12.)
- Les coûts supplémentaires de l'équipement à faibles émissions seraient entièrement contrebalancés par les économies associées à leur faible consommation d'énergie.

Cependant, les coûts initiaux supérieurs demeurent un obstacle important, surtout pour les ménages à faible revenu. Certaines technologies énergétiques carboneutres essentielles, comme les thermopompes, ont des coûts d'exploitation plus faibles que ceux des systèmes actuels, mais leur prix d'achat est beaucoup plus élevé. Les auteurs d'une étude sur la réduction majeure des émissions en Colombie-Britannique ont estimé que les ménages pourraient économiser en moyenne 800 \$ par année en 2030 et près de 1 000 \$ par année en 2050 grâce à des améliorations dans l'efficacité énergétique des résidences et des véhicules, mais que ces économies seraient associées à une augmentation de 4 000 \$ des coûts initiaux pour l'achat de nouveaux équipements (Navius Research, 2015).

En l'absence de politiques de soutien, beaucoup de ménages à faible revenu n'auraient probablement pas les moyens d'investir dans ces technologies à haute efficacité pour profiter des économies associées, particulièrement si ces économies sont réservées aux propriétaires, au détriment des locataires. Ce constat souligne l'importance de mesures stratégiques permettant à tous les ménages de participer à la transition vers la carboneutralité, comme des mécanismes de financement équitables ou un soutien ciblé améliorant l'accès des ménages à faible revenu aux technologies écoénergétiques.

Nous constatons que le recours à des équipements et à des mesures écoénergétiques est une étape importante dans la trajectoire vers la carboneutralité dans le secteur du bâtiment. Selon notre modèle, une meilleure isolation, des fenêtres plus efficaces et une conception améliorée des bâtiments permettraient de réduire l'intensité énergétique des bâtiments au Canada de 17 à 19 % d'ici 2030 et de 45 à 55 % d'ici 2050.

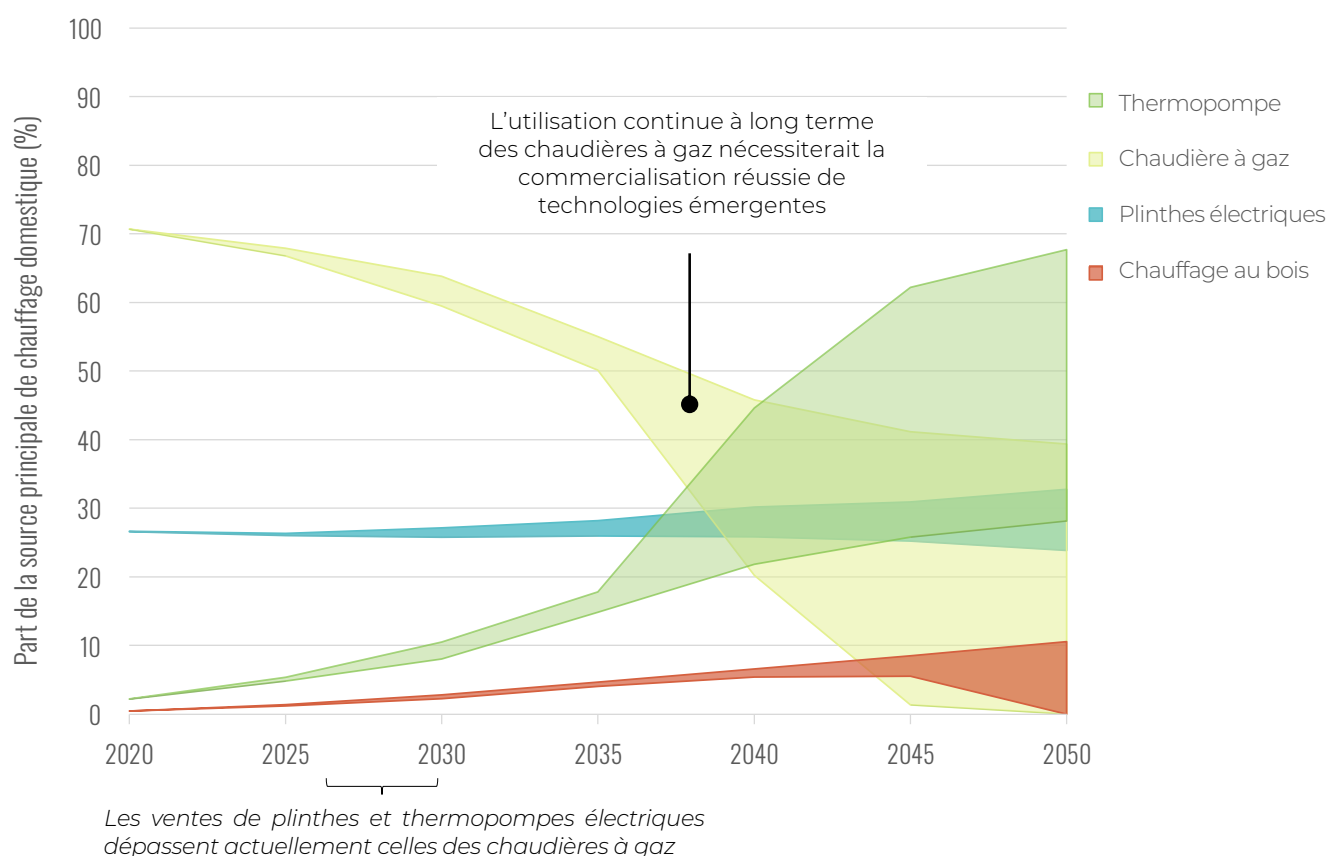
Ces changements réduiraient les émissions et s'inscriraient dans des décennies d'amélioration soutenue de l'efficacité énergétique de l'environnement bâti au Canada, l'efficacité énergétique moyenne des ménages s'étant accrue de 30 % au cours des 20 dernières années (RNCAN, 2019a).

Par ailleurs, notre modèle suggère que l'abandon des fournaises au profit de thermopompes électriques

(déjà commercialisées) aurait un rôle central et croissant à jouer pour réduire encore davantage les émissions (voir la figure 6). Les fournaies au gaz toujours utilisées fonctionneraient de plus en plus avec des gaz propres comme l'hydrogène ou le gaz naturel renouvelable, plutôt qu'avec du gaz naturel ordinaire. Cependant, toutes ces avenues s'appuyant sur les gaz propres requerraient la mise en marché de technologies qui en sont toujours à des stades précoces

de développement. Pour les scénarios dans lesquels ces technologies ne seraient pas viables à grande échelle, nous prévoyons que les fournaies à combustion seraient complètement remplacées par des thermopompes et des plinthes électriques d'ici 2050, de même que par le chauffage au bois dans certains cas. Nous nous penchons davantage sur les thermopompes et les gaz propres dans les lignes qui suivent.

Figure 6 : Pourcentage des technologies de chauffage installées comme source de chauffage principale, toutes trajectoires confondues



L'électrification des bâtiments à l'aide de thermopompes, élément essentiel de la transition vers la carboneutralité

Nos scénarios montrent tous que l'électrification du chauffage est un élément essentiel de la transition vers la carboneutralité dans le secteur du bâtiment au Canada. L'électrification se fera soit par chauffage direct par résistance (à l'aide de plinthes électriques, par exemple), soit par thermopompe. Les thermopompes (qui fonctionnent comme des systèmes de climatisation inversés, c'est-à-dire qu'elles extraient l'air chaud de l'extérieur et l'entraînent à l'intérieur) sont déjà assez répandues : aux États-Unis, 50 % des nouveaux immeubles résidentiels à logements multiples en sont munis, et en 2019, une thermopompe était installée dans plus de 20 millions de résidences dans le monde (AIE, 2019a). On sait déjà qu'au chapitre des coûts, une thermopompe servant à la fois pour le chauffage et la climatisation fait concurrence à une fournaise au gaz combinée à un système de climatisation dans la plupart des régions des États-Unis (Billimoria et coll., 2018).

Des bâtiments à l'efficacité énergétique très élevée et chauffés à l'aide de thermopompes adaptées au climat canadien existent déjà au pays. Par exemple, une habitation passive de 50 unités à Fort St. John, en Colombie-Britannique, utilise des thermopompes qui assurent un confort adéquat à des températures extérieures allant jusqu'à -20 °C (Passive House Canada, 2020)¹⁴. Notre modèle prévoit que la proportion des ménages utilisant une thermopompe, qui est de 2 % à l'heure actuelle, atteindrait de 8 à 11 % en 2030, et de 28 à 68 % en 2050, alors que l'utilisation des plinthes électriques demeurerait stable et serait la source principale de chauffage pour 24 à 33 % des ménages en 2050. Au total, nous estimons que 52 à 100 % des ménages se chaufferaient à l'électricité en 2050 (comparativement à 30 % aujourd'hui). Par ailleurs, si l'on tenait compte des ventes d'appareils neufs (plutôt que du nombre total d'équipements installés), la

proportion augmenterait beaucoup plus rapidement. En effet, notre modèle prévoit que les ventes de plinthes électriques et de thermopompes surpasseraient celles de fournaies au gaz entre 2027 et 2032.

Cependant, pour que ces technologies puissent être adoptées à grande échelle au Canada, les réseaux électriques du pays devront évoluer considérablement (cette question est traitée à l'encadré 3). Le secteur du bâtiment agirait à la fois comme facteur contributif et comme solution pour les nombreux défis que devront relever les réseaux électriques canadiens dans la transition vers la carboneutralité. Par exemple, le National Renewable Energy Laboratory des États-Unis a estimé que le pic de demande en électricité passerait de l'été à l'hiver en raison de l'adoption à grande échelle des thermopompes, et la demande maximale augmenterait aussi de 20 à 33 % (Mai et coll., 2018). Ces changements seraient même probablement plus marqués au Canada en raison du climat froid. Toutefois, l'équipement intelligent installé dans les bâtiments pourrait contribuer à réduire la pression sur le réseau électrique. Les chauffe-eau électriques, par exemple, peuvent être conçus pour chauffer l'eau lorsque les prix de l'électricité sont faibles, ce qui « déplace » la demande sans interrompre l'approvisionnement en eau chaude.

Par ailleurs, pour assurer une vaste adoption des thermopompes, il faudrait aussi des mesures de soutien ou des modèles de financement novateurs, ou les deux. Plus particulièrement, les Canadiens à faible revenu, notamment ceux qui sont locataires, pourraient être incapables de procéder à des rénovations écoénergétiques et à l'achat de thermopompes sans aide financière ciblée.

L'électrification du chauffage des bâtiments sera vraisemblablement plus complexe dans certaines régions. Les thermopompes fonctionnent généralement mieux en présence d'une forte humidité; leur adoption pourrait donc être plus rapide dans les régions au climat plus humide, comme l'est du Canada et

¹⁴ Un chauffage au gaz naturel prend le relais à des températures inférieures, mais de telles unités pourraient plutôt être équipées d'un système électrique de chauffage direct par résistance.

l'ouest de la Colombie-Britannique. Les régions rurales du Canada où l'accès aux réseaux électriques est plus simple et moins coûteux que l'accès aux réseaux

gaziers pourraient adopter les thermopompes plus rapidement que certaines régions urbaines. Au contraire, les communautés éloignées qui ne sont

ENCADRÉ 6



Apex, au Nunavut, fait partie des collectivités éloignées qui dépendent de sources d'énergie hors réseau comme des génératrices au diesel. Beaucoup d'options s'offrent à ces collectivités pour réduire leur utilisation de diesel, notamment l'amélioration de l'efficacité énergétique et l'adoption de sources d'énergie renouvelable.

Réduire la dépendance au diesel dans les collectivités hors réseau

Le Canada compte 292 collectivités hors réseau (RNCAN, 2020e); beaucoup d'entre elles ont un accès limité à des réseaux sûrs, fiables et abordables de gaz naturel et d'électricité, des services que la plupart des Canadiens tiennent pour acquis. Ces communautés éloignées, dont près des deux tiers sont autochtones, doivent produire leur énergie localement, généralement à l'aide de génératrices coûteuses et polluantes. Dans un récent rapport du Pembina Institute, on estime qu'environ 682 millions de litres d'équivalent diesel seront consommés dans les collectivités éloignées en 2020, ce qui équivaut aux émissions d'environ 500 000 voitures en un an (Lovekin et coll., 2020).

En plus de libérer des émissions, l'utilisation des génératrices au diesel comporte des désavantages sociaux et économiques. La pollution de l'air ainsi que les fuites et les déversements des génératrices au diesel dans l'environnement sont nocifs pour la santé et le bien-être des résidents des collectivités (Santé Canada, 2019b). Les limites de charge de ces génératrices restreignent la capacité des collectivités à bâtir de nouvelles infrastructures, comme des entreprises et des logements, malgré la croissance de leur population. Et même avec des subventions, les coûts de l'électricité dans ces collectivités peuvent s'élever à plus du double des coûts payés par un ménage moyen au Canada (Régie de l'énergie du Canada, 2017).

Bien que les collectivités hors réseau (de même que les gouvernements provinciaux et fédéral) aient plusieurs options pour réduire la dépendance au diesel, il n'y a pas de solution applicable à tous. Les besoins énergétiques de chaque collectivité, ainsi que les défis et les occasions qui lui sont propres, diffèrent notamment selon sa taille, son climat et sa situation géographique. Les solutions qui s'offrent aux communautés du Nord sont particulièrement limitées en raison de l'éloignement, du froid, des hivers rudes et des coûts élevés de déploiement.

La trajectoire vers la carboneutralité dans les collectivités éloignées pourrait tirer parti de nombreuses technologies. Le diesel utilisé pour le chauffage et l'électricité pourrait être remplacé par des sources d'énergie propre, comme l'éolien, le solaire, l'hydroélectricité, la géothermie ou la biomasse. L'utilisation de diesel pourrait aussi être réduit ou éliminé par un raccordement des collectivités aux réseaux électriques provinciaux et territoriaux. D'autres technologies de stockage d'énergie et de réseaux intelligents pourraient également être déployées dans les communautés éloignées pour mieux gérer l'approvisionnement variable en électricité produite par des énergies renouvelables intermittentes. De plus, en améliorant l'efficacité énergétique des bâtiments, on pourrait réduire la demande en énergie et améliorer la qualité de l'air intérieur. D'autres technologies émergentes, qui n'ont pas encore été déployées dans les collectivités éloignées, pourraient également contribuer à réduire la dépendance au diesel (p. ex., génératrices à énergie marémotrice pour les collectivités côtières ou petits réacteurs modulaires).

Malgré les défis associés au déploiement de certaines de ces technologies, y compris les coûts élevés, le caractère intermittent des sources d'énergie renouvelable et la difficulté à obtenir le financement requis, de plus en plus de projets d'énergie propre montrent un potentiel important. Selon le rapport du Pembina Institute, le recours aux énergies renouvelables a presque doublé dans les communautés éloignées entre 2015 et 2020; on a notamment enregistré une augmentation considérable des projets de biothermie et d'énergie solaire. Durant cette période de cinq ans, les collectivités éloignées ont lancé 82 projets de réduction de l'emploi du diesel, multiplié par 11 leur capacité solaire, connecté 3 nouvelles communautés aux réseaux électriques provinciaux ou territoriaux, contribué à l'ajout de plus de 40 000 MWh d'énergie renouvelable et enregistré une réduction de plus de 12 millions de litres de diesel utilisé par année. De nombreuses autres initiatives en sont encore à des stades précoces de développement (Lovekin et coll., 2020).

La participation des Autochtones aux projets d'énergie renouvelable est au cœur de cette transition énergétique, surtout dans les communautés éloignées. Dans un rapport de 2020 de Indigenous Clean Energy, on précise qu'il y a actuellement entre 2 107 et 2 507 projets autochtones d'énergie propre en cours au Canada, parmi lesquels des projets de production d'énergie, de distribution d'électricité, de production de chaleur et d'efficacité énergétique. Certains s'appuient sur des systèmes de petite ou moyenne envergure, et d'autres sont des projets de production d'énergie à grande échelle. La participation des Autochtones aux projets d'énergie propre peut entraîner des avantages économiques et sociaux importants, comme la création d'emplois, et contribuer à renforcer la capacité des communautés autochtones à répondre à leurs propres besoins en énergie.

Les retombées de ces projets vont au-delà de l'accès fiable à de l'énergie abordable pour les collectivités : ils peuvent aussi contribuer à améliorer l'autodétermination des peuples autochtones et à faire avancer la réconciliation, surtout lorsque les communautés autochtones sont propriétaires des projets et les dirigent (Hoicka et coll., 2020). Toutefois, une nouvelle étude ayant analysé 194 projets d'énergie renouvelable de plus de 1 MW auxquels participent des communautés autochtones au Canada a révélé que seuls 41 d'entre eux étaient contrôlés par les communautés. Ce constat soulève des questions importantes quant à l'apport réel des activités liées à l'énergie renouvelable auxquelles prennent part des communautés autochtones dans la réconciliation et l'autodétermination à l'heure actuelle (Hoicka et coll., 2020).

Les gaz propres pourraient grandement contribuer à l'atteinte de la carboneutralité dans le secteur du bâtiment

L'électrification du chauffage sera plus simple dans les nouvelles constructions que dans les bâtiments existants, qui n'auront possiblement pas besoin de nouveaux systèmes de chauffage avant de nombreuses années. Les gaz propres, comme l'hydrogène et le gaz naturel renouvelable, constituent une option prometteuse et abordable pour la réduction des émissions des bâtiments plus vieux¹⁵. Introduits dans le réseau de gaz naturel grâce à l'infrastructure déjà en place, ces gaz réduiraient les émissions de tous les bâtiments raccordés au réseau. Par exemple, ATCO (en Alberta) prévoit ajouter 5 % d'hydrogène à l'un de ses réseaux de gaz naturel en 2021, et Fortis ajoute du gaz naturel renouvelable issu de matière organique en décomposition (comme des déchets alimentaires) à des réseaux en Colombie-Britannique (Canadian Utilities Limited, 2020; Fortis BC, 2020a).

L'utilisation de gaz propres variera probablement selon les régions, les bâtiments, les coûts, les investissements en infrastructure, les conditions locales et d'autres facteurs. De façon générale, notre modèle

indique que les gaz propres pourraient grandement contribuer à la réduction des émissions libérées par les bâtiments équipés de fournaies au gaz naturel. Nous estimons que d'ici 2050, les gaz propres pourraient fournir une quantité d'énergie totale qui équivaudrait à 32 % de la demande actuelle en gaz naturel dans les bâtiments du Canada.

L'adoption à grande échelle des gaz propres se heurte cependant à un certain nombre d'obstacles. À l'heure actuelle, les coûts de l'hydrogène sont élevés; toutefois, une récente vague de nouveaux investissements pourrait réduire de 40 à 50 % le prix de ce gaz au cours de la prochaine décennie, et de 70 % d'ici 2050 (BloombergNEF, 2020). Le recours à l'hydrogène s'accompagne aussi de défis et de coûts liés à l'infrastructure, notamment pour la modification des pipelines et de l'équipement existants. Dans son état actuel, le réseau gazier canadien tolère une proportion moyenne de 5 % d'hydrogène; certaines parties du réseau pourraient néanmoins tolérer des pourcentages beaucoup plus élevés, qui pourraient atteindre 25 %. Pour atteindre la carboneutralité, il faudrait dépasser les 25 %, et pour ce faire, il faudrait non seulement apporter des modifications importantes aux pipelines et aux réseaux de distribution actuels, mais aussi remplacer une bonne part des fournaies, des chauffe-eau, des fours et des foyers au gaz naturel

¹⁵ Ceci ne s'applique pas aux vieux bâtiments où l'on utilise de l'huile pour le chauffage; dans ces derniers la transition vers un système électrique serait plus économique que l'utilisation de gaz propres.

utilisés aujourd'hui (Conseil national de recherches Canada, 2017).

Pour ce qui est du gaz naturel renouvelable, il peut être utilisé à 100 % dans le réseau de gaz naturel sans modifications à l'infrastructure (puisque'il s'agit simplement de méthane produit à partir de biomasse plutôt que de méthane fossile). Son coût demeure cependant élevé. De plus, les matières premières étant limitées, les économies d'échelle ont peu de chances de réduire les coûts. Si de nouvelles technologies s'appuyant sur la biomasse de seconde génération – la gazéification des déchets de bois, par exemple – se révélaient viables, rentables et utilisables à grande échelle, elles pourraient contribuer à réduire davantage les coûts et à améliorer l'approvisionnement (Fortis BC, 2020b). Mais cette possibilité demeure incertaine¹⁶.

Le maintien des réseaux de distribution de gaz naturel actuels présenterait également des défis économiques importants. Tous les scénarios de notre modèle prévoient une diminution considérable de l'utilisation totale de gaz (gaz naturel, hydrogène, gaz naturel renouvelable et autres gaz) dans le temps. Cette prévision est valable malgré la croissance de la population, en raison de l'efficacité énergétique accrue des résidences et de l'adoption des thermopompes. Toutefois, comme les services publics auraient à maintenir leurs réseaux gaziers malgré une diminution de la clientèle, les coûts associés à la distribution de gaz propres augmenteraient pour les ménages qui les utiliseraient, ce qui soulèverait à long terme des enjeux économiques, de même que d'éventuels problèmes d'équité : les ménages n'ayant pas la capacité de payer

pour l'installation d'une thermopompe électrique se retrouveraient avec des frais fixes de plus en plus élevés pour l'utilisation du réseau gazier.

La viabilité des gaz propres sera influencée par les politiques publiques. Les gouvernements exigeront-ils une augmentation du pourcentage de gaz propres, comme le prévoit la Colombie-Britannique (Gouvernement de la Colombie-Britannique, 2018)? Le Canada optera-t-il pour des investissements publics importants dans le but de rendre les réseaux gaziers compatibles avec l'hydrogène, en remplaçant les conduites actuelles par du plastique, comme l'a fait le Royaume-Uni entre 1968 et 1976 pour passer du gaz de houille au gaz naturel¹⁷? Les gouvernements modifieront-ils le marché des gaz propres en exigeant la fusion des services publics de gaz naturel et d'électricité, ou au moins en optant pour une coréglementation des services? Les marchés reconnaîtront-ils la valeur potentielle des réseaux gaziers industriels, commerciaux et résidentiels pour le stockage d'énergie?

L'avenir des gaz propres dans le secteur du bâtiment est complexe et incertain. Toutefois, le réseau de distribution gazier contribuera probablement à l'atteinte de la carboneutralité dans l'environnement bâti canadien. Au minimum, il pourrait aider à réduire les émissions libérées par les plus vieux bâtiments à moyen terme, en permettant l'ajout de gaz propres au gaz naturel, ce qui pourrait représenter une sorte de pont vers l'électrification ou vers des proportions plus élevées de gaz propre.

¹⁶ Les solutions technologiques à émissions négatives représentent une autre avenue possible pour maintenir l'utilisation de gaz dans les bâtiments. Au lieu de réduire les émissions des bâtiments à la source par l'ajout de gaz propres, les solutions permettraient de compenser ces émissions ailleurs. Toutefois, il s'agit de technologies émergentes; leur coût et leur disponibilité demeurent très incertains. Dans tous les cas, notre modèle indique que même si ces solutions se révélaient viables, leur adoption serait limitée dans le secteur du bâtiment en raison de la meilleure rentabilité d'autres options. La pyrolyse directe, ou la séparation du méthane en hydrogène et en carbone au point d'utilisation, est une autre solution pour l'utilisation de gaz propres dans le secteur du bâtiment. Cependant, la possibilité de déployer cette technologie demeure incertaine, et ses avantages ne se concrétiseraient qu'à très long terme.

¹⁷ Le gouvernement écossais et l'organisme de réglementation en énergie Ofgem ont récemment lancé un projet pilote de quatre ans qui vise à convertir entièrement à l'hydrogène 300 résidences. Des essais de transport d'hydrogène dans l'infrastructure du réseau gazier non utilisée s'effectueront également en parallèle (Ambrose, 2020).

4.2 TRANSPORT : DÉPLACEMENT DES PERSONNES ET DES MARCHANDISES

PRINCIPALES TRAJECTOIRES VERS LA CARBONEUTRALITÉ

- L'utilisation accrue des transports publics et des modes de transport actifs – stimulée entre autres par des changements dans l'aménagement des villes et des collectivités – jouerait un rôle crucial pour l'atteinte de la carboneutralité.
- Les véhicules personnels ne disparaîtront pas; ainsi, la carboneutralité exigera ultimement l'adoption de carburants de remplacement et de nouvelles technologies automobiles.
- Au chapitre des véhicules personnels, le rôle de l'électrification serait considérable, les véhicules électriques devenant courants. Cependant, les moteurs à combustion interne pourraient avoir une vie plus longue que prévu – si ces moteurs fonctionnent de plus en plus aux biocarburants.
- L'avenir du transport des marchandises lourdes est plus incertain et pourrait emprunter différentes avenues : électricité, hydrogène, biocarburants et combustibles fossiles carboneutres..

Dans une grande économie moderne, on doit transporter un volume énorme de personnes et de biens chaque jour, et l'ensemble de ces déplacements exigent des quantités énormes d'énergie. À l'heure actuelle, les combustibles fossiles sont de loin les carburants les plus utilisés dans le secteur du transport au Canada : ils fournissent 93 % de l'énergie utilisée, ce qui génère 24 % des émissions totales du pays (ECCC, 2019b).

La trajectoire vers la carboneutralité dans le secteur du transport est claire, mais complexe : le Canada doit grandement réduire son utilisation des combustibles fossiles tout en maintenant un transport efficace des personnes et des marchandises aux quatre coins du pays. La trajectoire vers la carboneutralité est bien comprise pour certains aspects du transport; les solutions sont entre autres un aménagement intelligent des municipalités et un réseau de transport collectif hautement développé, ainsi que la transition vers les véhicules électriques comme principal type de véhicule personnel partout au pays. Par ailleurs, il est beaucoup moins évident de prédire quels moteurs à combustion et quels carburants seront utilisés pour approvisionner les gros et les moyens véhicules servant au transport de marchandises.

Le rôle crucial d'un aménagement intelligent des collectivités et d'un réseau de transport collectif hautement développé

La transition vers différents modes de transport, surtout dans les zones urbaines, peut s'ajouter à la transition vers les véhicules personnels zéro émission. L'utilisation accrue du transport collectif et des modes de transport actifs, comme le vélo, est un facteur de réduction des émissions dans tous les scénarios analysés : les estimations indiquent qu'elle permettrait de réduire les émissions de 7 à 8 Mt d'éq. CO₂ d'ici 2030 et d'un maximum de 15 Mt d'ici 2050, ce qui équivaut à retirer de 2,1 à 2,5 millions de véhicules des routes d'ici 2030 et jusqu'à 4,6 millions de véhicules d'ici 2050 (RNCAN, 2020b). Une telle transition dans le transport urbain vient avec d'autres avantages, notamment la réduction de la congestion et de la pollution de l'air, la préservation des espaces verts et l'adoption de modes de vie plus sains (Giles-Corti et coll., 2010; Lachapelle et Pinto, 2016; Litman, 2015; Sims et coll., 2014; Jaccard et coll., 2019).



Dans beaucoup de collectivités canadiennes, cette transition est déjà en cours. À l'échelle du pays, le nombre d'usagers du transport public quotidiens a grimpé de 60 % entre 1996 et 2016, alors que le nombre d'automobilistes a augmenté de moins de 30 % (Statistique Canada, 2017). Les quartiers urbains commencent aussi à opter pour des aménagements mieux adaptés aux piétons et au transport collectif. La Ville de Vancouver, par exemple, a investi dans l'ajout de 325 kilomètres à son réseau cyclable, modifié des règlements de zonage afin d'encourager le cyclisme et le transport collectif, et créé une plateforme pour l'utilisation des espaces publics et des rues dans le cadre de son programme VIVA. Ces modifications ont porté l'ensemble des déplacements à pied, à vélo et en transport collectif à 54 % en 2020. De plus, la distance parcourue en voiture par personne a chuté de 28 % depuis 2007 (Ville de Vancouver, 2020; Transports Canada, 2011).

Comme l'incidence de l'aménagement urbain est beaucoup plus difficile à évaluer que l'utilisation du transport public, cet aspect précis n'a pas été pris en compte dans notre analyse. D'autres études ont toutefois révélé que les aménagements visant à réduire le besoin de posséder un véhicule personnel pourraient contribuer à réduire les émissions de 20 à 50 % d'ici 2050, par rapport aux chiffres de 2010 (Sims et coll., 2014). Par ailleurs, la réduction des émissions n'est que l'un des avantages d'un aménagement intelligent. En effet, les collectivités conviviales pour les piétons, où l'on a accès à un réseau de transport collectif bien

intégré, comportent également des avantages comme une pollution de l'air moindre, un trajet moins long entre le travail et la maison, des coûts de transport réduits, des expériences de vie plus agréables et un accès plus facile aux services (Devlin et coll., 2009; Giles-Corti et coll., 2010; Sims et coll., 2014; Ewing et Cervero, 2001; Leyden, 2003; Lund, 2002; Frank et Engelke, 2001).

Les automobiles ne disparaîtront pas des routes canadiennes dans un avenir prévisible. Malgré un aménagement efficace des collectivités et une amélioration du transport actif et collectif, il y aura toujours beaucoup de véhicules sur les routes, surtout dans les banlieues, les petites municipalités et les régions rurales, moins adaptées au transport actif et collectif. Ainsi, la réduction des émissions des véhicules sera une part essentielle de la transition du Canada vers la carboneutralité.

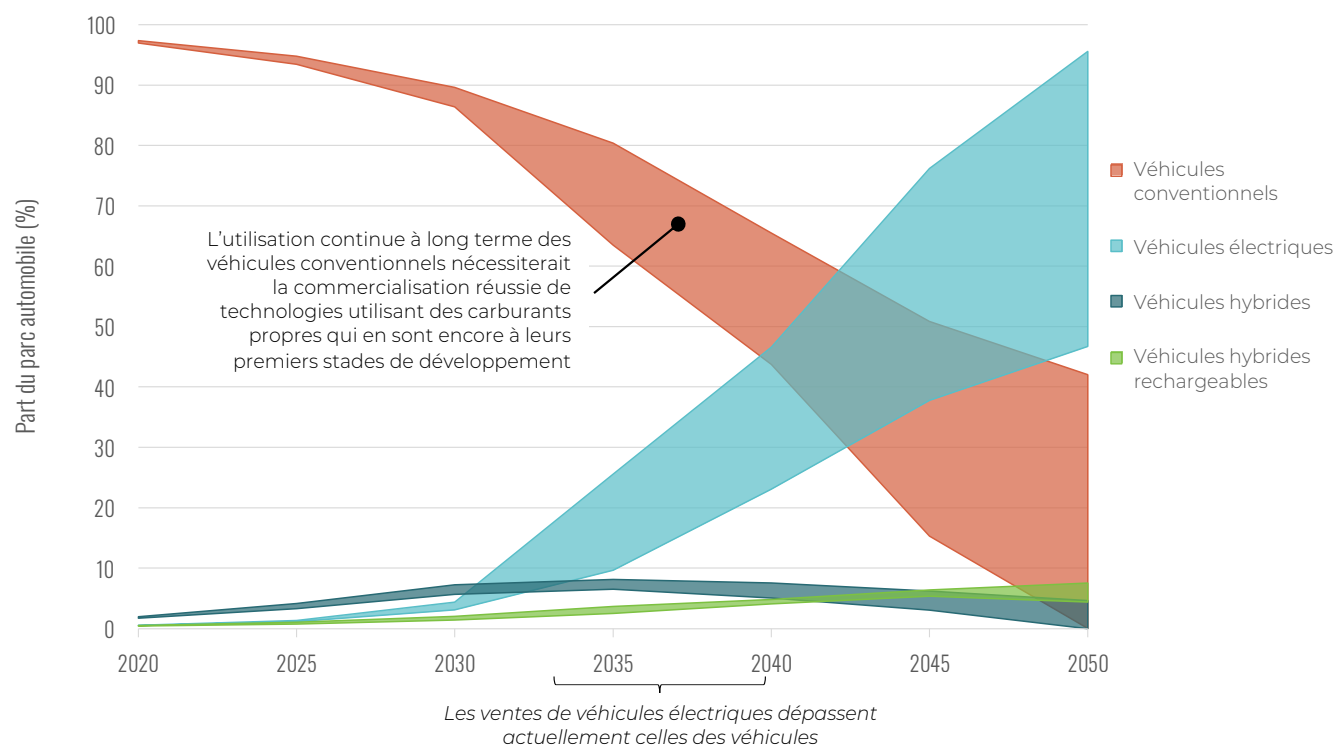
Les véhicules électriques sont essentiels pour rendre le transport personnel carboneutre

L'électrification des véhicules est cruciale pour la transition du Canada vers la carboneutralité dans tous les scénarios analysés. Les moyens de transport alimentés par combustibles fossiles sont la norme dans le secteur depuis des décennies, mais la situation évolue rapidement : alors qu'il y a 10 ans les ventes de véhicules électriques frôlaient le zéro, on comptait plus de 150 000 de ces véhicules sur nos routes au début de 2020 (Mobilité électrique Canada, 2020). Selon les conditions

du marché et les politiques actuelles et projetées, notre modèle prévoit que les véhicules électriques représenteraient de 3 à 4 % de l'ensemble des véhicules personnels sur les routes d'ici 2035, des pourcentages faibles, mais qui sont le reflet d'une transition importante. Au-delà de 2035, les véhicules électriques deviendraient rapidement courants : ils représenteraient de 47 à 96 % de tous les véhicules d'ici 2050. De plus, les pourcentages les plus faibles de ces projections ressortent uniquement de scénarios où les biocarburants de seconde génération se révèlent suffisamment viables, rentables

et utilisables à grande échelle pour faire concurrence aux véhicules électriques (ce qui est peu probable; nous y revenons plus loin). Si l'on considère la part des ventes, la transition vers les véhicules électriques se ferait encore plus rapidement; notre modèle prédit qu'ils surpasseraient les véhicules traditionnels entre 2033 et 2040. Toutefois, comme nous l'expliquons plus loin, la transition pourrait survenir encore plus tôt avec la mise en place de nouvelles politiques nationales et étrangères sur les véhicules électriques.

Figure 7 : Part du marché totale de différents types de véhicules de transport des personnes au Canada, toutes trajectoires confondues





Comment les véhicules électriques pourraient-ils s'emparer aussi rapidement du marché des véhicules personnels? Selon notre analyse, d'ici 2033, le coût d'un nouveau véhicule électrique sera le même que celui d'un véhicule ou d'un camion traditionnel, et ce, même si l'on ne tient pas compte de leur coût d'exploitation inférieur (cette équivalence des coûts survient même avant 2033 pour certaines classes de véhicules). De plus, le développement continu des infrastructures de recharge, l'expansion de la production d'électricité et une plus grande acceptation des consommateurs favoriseraient aussi la transition vers l'électrique.

La vitesse de transition décrite dans notre modèle pourrait même être sous-estimée. En effet, d'autres études estiment que la diminution des coûts et l'adoption des véhicules électriques seront encore plus rapides d'ici 2050. Par exemple, BloombergNEF (2020) prédit une parité des prix des véhicules électriques et des véhicules à combustion interne d'ici 2025 dans la plupart des segments du marché. Les scénarios de décarbonisation profonde de McKinsey (2020) et de Shell (2018) indiquent que les moteurs à combustion interne pourraient représenter moins de la moitié des ventes dans le monde d'ici 2033 et être complètement

écartés d'ici 2050. Dans le rapport Pathways to Deep Decarbonization in Canada, on estime que d'ici 2050 les véhicules électriques représenteront près de 100 % des véhicules de tourisme légers au pays, ce qui correspond aux pourcentages les plus élevés de nos projections (Bataille et coll., 2015).

L'adoption croissante du véhicule électrique pourrait néanmoins varier considérablement d'une région à l'autre. La Colombie-Britannique, par exemple, est actuellement championne en la matière et selon notre analyse, elle devrait le rester. À l'opposé, il faudra plus de temps aux collectivités du Nord pour faire la transition, en raison entre autres du coût plus élevé de l'électricité. Les ménages en milieu rural pourraient aussi tarder à adopter le véhicule électrique, puisqu'ils doivent parcourir de plus longues distances et que l'arrivée de réseaux suffisamment efficaces pour la recharge risque de prendre plus de temps dans les régions à faible densité de population¹⁸. Mais, nous le répétons, l'adoption du véhicule électrique au pays pourrait s'accélérer encore plus rapidement avec la mise en place de politiques nationales et étrangères favorables. De plus, l'incidence des véhicules électriques sur la réduction de la pollution atmosphérique pourrait encourager la création de telles politiques (voir l'encadré 7).

¹⁸ Dans certaines régions éloignées, particulièrement dans le Nord canadien, on pourrait continuer à utiliser à long terme des véhicules traditionnels fonctionnant aux biocarburants ou des véhicules hybrides, en raison de l'étendue du territoire et des températures froides qui peuvent réduire l'autonomie des batteries électriques. Les défis associés à ces régions expliquent en partie pourquoi l'adoption des véhicules électriques n'atteint jamais 100 % dans notre modèle, comme on peut le voir à la figure 7.

ENCADRÉ 7

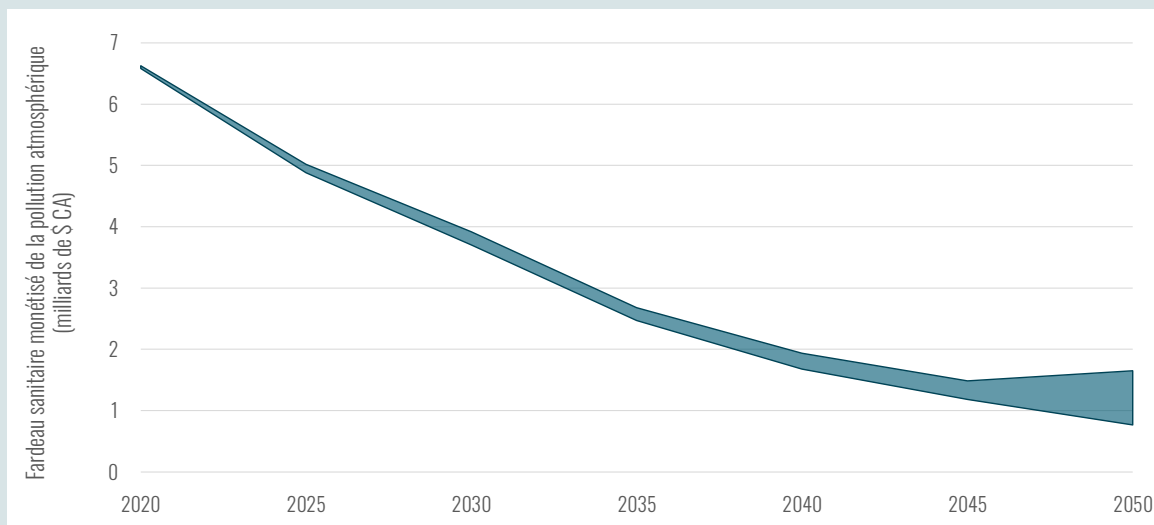
Réduction de la pollution atmosphérique et bienfaits sur la santé

Les émissions de GES entraînent souvent l'apparition de polluants atmosphériques nocifs qui augmentent le risque de maladies et de décès prématuré, par exemple les particules fines et l'ozone troposphérique. Selon l'Organisation mondiale de la santé (2016), la pollution atmosphérique est la plus grande menace environnementale pour la santé humaine dans le monde; elle est aussi associée à un important fardeau économique. On estime que la pollution atmosphérique tue environ 20 000 Canadiens chaque année; plus de 17 000 de ces décès seraient attribuables à l'utilisation de combustibles fossiles (Lelieveld et coll., 2020). Les coûts économiques directs estimés des particules fines et de l'ozone troposphérique au Canada s'élèvent à 46 milliards de dollars par année (Institut international du développement durable, 2017), et Santé Canada (2019a) estime à environ 114 milliards de dollars les conséquences économiques annuelles de la pollution atmosphérique sur la santé publique.

Une transition vers la carboneutralité réduirait non seulement les émissions de GES, mais aussi la libération de polluants atmosphériques comme les particules fines, les oxydes d'azote et le dioxyde de soufre, qui ont des répercussions directes sur la santé de la population canadienne. La combustion de combustibles fossiles libère également ces polluants; ainsi, une diminution des émissions de GES est généralement accompagnée d'une diminution de la pollution atmosphérique.

La figure 8 présente la diminution du fardeau économique sanitaire découlant de la pollution atmosphérique, en lien avec la réduction de la mortalité associée aux particules fines, au long de la trajectoire vers la carboneutralité du Canada. Les avantages pour la santé seraient particulièrement importants en Ontario et au Québec, où la pollution atmosphérique près des grands centres serait grandement réduite (Santé Canada, 2019a; Manisalidis et coll., 2020; Institut international du développement durable, 2017). De surcroît, les avantages réels seraient vraisemblablement plus importants que ceux décrits à la figure 8, puisque notre analyse tient compte uniquement du fardeau associé aux émissions de particules fines. Les retombées réelles sur la santé dépendront du ou des types de systèmes carboneutres adoptés par le Canada (cette question est abordée à la section 5.2). Les avantages dépendront aussi des avancées en matière de technologies de contrôle des polluants (indépendamment des efforts de réduction des émissions du pays).

Figure 8 : Fardeau économique annuel national en lien avec la mortalité associée aux polluants atmosphériques libérés par la production et l'utilisation d'énergie, le long de la trajectoire vers la carboneutralité



Source : Soltanzadeh et Hakami, 2020

Dans nos scénarios, la diminution de la pollution atmosphérique attribuable au transport est un facteur particulièrement important de la réduction des répercussions sur la santé présentée à la figure 8. Notre modèle prévoit que de 73 à 77 % des bienfaits pour la santé projetés d'ici 2050 découleraient d'une réduction des émissions dans le secteur du transport. La réduction des émissions des véhicules lourds (p. ex., transport de marchandises ou transport public) est d'ailleurs un facteur particulièrement important, qui représenterait de 45 à 48 % des bienfaits pour la santé durant cette période.

Plusieurs autres études ont donné des résultats semblables quant à l'incidence de la réduction de la pollution atmosphérique. Une étude a révélé que le plan du Canada d'éliminer les centrales au charbon d'ici 2030 permettrait d'éviter plus de 1 000 décès prématurés et de réduire le fardeau lié à la santé de 5 milliards de dollars d'ici 2035 (Israël et Flanagan, 2016). En outre, un rapport récent de l'Association canadienne des médecins pour l'environnement indique que l'on pourrait sauver plus de 110 000 vies entre 2030 et 2050 grâce à l'amélioration de la qualité de l'air si le Canada atteint ses cibles de 2030 et de 2050 en matière de réduction des émissions (Edger et coll., 2020).

Malgré ces bienfaits importants pour la santé, la pollution atmosphérique demeurerait un défi au Canada d'ici 2050. En effet, on s'attend à ce que la pollution de l'air associée aux conséquences des changements climatiques (notamment la multiplication et l'aggravation des feux incontrôlés, et l'élévation des concentrations ozone troposphérique due à l'augmentation des températures) augmente alors que la pollution due aux émissions de GES diminuera.

L'avenir à long terme des véhicules conventionnels dépend de progrès significatifs des biocarburants

Que penser des véhicules à essence? Notre modèle indique que les véhicules traditionnels continueraient de servir au transport des personnes à court et à moyen terme, mais avec une efficacité de plus en plus grande. Dans tous les scénarios analysés, la réduction des émissions dans le secteur du transport d'ici 2030 découle principalement d'une amélioration de l'efficacité des moteurs traditionnels, y compris un recours accru aux moteurs hybrides¹⁹. L'ajout de biocarburants à l'essence aiderait aussi à réduire les émissions d'ici 2030. À long terme cependant, l'utilisation de véhicules traditionnels exigerait une transition complète de l'essence aux biocarburants.

Selon notre analyse, la place des véhicules traditionnels dans le transport des personnes à long terme fait l'objet d'une grande incertitude. Certains de nos scénarios indiquent que les véhicules électriques domineront entièrement le marché d'ici 2050; quelques véhicules hybrides rechargeables seraient aussi sur nos routes. Dans d'autres scénarios, pas moins de 42 % des véhicules personnels au Canada pourraient être munis de moteurs à combustion interne fonctionnant aux biocarburants, malgré la tendance mondiale à l'électrification des transports. Pourquoi? Quels sont les obstacles en cause?

Si l'on pense constater une utilisation importante des biocarburants pour le transport des personnes au Canada, c'est parce que le pays a le potentiel de devenir un bon producteur de biocarburants à faible coût par rapport au reste du monde, en raison de l'abondance de matières premières. Toutefois, pour que cela se produise, le mode de production des biocarburants liquides devra changer. Si l'on décuplait l'utilisation de biocarburants pour le transport, comme le prévoient certains de nos scénarios, on mettrait une pression importante sur les

matières premières (notamment les cultures céréalières comme le blé et le maïs et les cultures oléagineuses comme le soya et le canola), ce qui ferait augmenter les prix et aurait des répercussions de plus en plus grandes en matière de sécurité alimentaire. Il faudrait donc que les biocarburants créés à partir de matières premières de seconde génération, comme les déchets, les résidus et le panic érigé, se révèlent viables, rentables et utilisables à grande échelle, ce qui demeure encore incertain.

De façon générale, l'avenir du moteur à combustion interne dans un Canada carboneutre est beaucoup moins assuré que celui des véhicules électriques, puisque la viabilité des biocarburants avec lesquels fonctionneraient les véhicules traditionnels demeure incertaine en raison d'obstacles majeurs. Il est donc beaucoup plus probable que se concrétisent les prévisions les plus élevées pour les véhicules électriques que pour les véhicules traditionnels (voir la figure 7); toutefois, il faudrait une amélioration marquée de la capacité de production d'électricité et des réseaux intelligents (cette question est abordée à l'encadré 3).

Un autre facteur renforce la grande probabilité que les véhicules électriques dominent le transport des personnes : l'évolution des politiques au Canada et ailleurs. Beaucoup de pays, de villes et de régions ont annoncé l'interdiction prochaine de vendre des véhicules à moteur à combustion interne, notamment le Québec d'ici 2035 et la Colombie-Britannique d'ici 2040, la Norvège d'ici 2025, Paris, la Suède et le Royaume-Uni d'ici 2030, la Californie d'ici 2035 et la France d'ici 2040 (Gouvernement du Québec, 2020; Gouvernement de la Colombie-Britannique, 2020; Gouvernement du Royaume-Uni, 2020; Hampel, 2019; CBC, 2017; Bureau du gouverneur Gavin Newsom, 2020). D'autres gouvernements pourraient mettre en application de telles interdictions afin de réduire la pollution atmosphérique dans les zones urbaines (voir l'encadré 7), puisque la transition de l'essence aux biocarburants ne résoudrait pas ce problème, comme nous l'expliquons à la section 5.2.

¹⁹ L'efficacité automobile continuerait de s'améliorer au-delà de 2030. Nous estimons que les véhicules traditionnels seront en 2050 de 26 à 45 % plus efficaces qu'aujourd'hui, dans une optique de carboneutralité et selon une tendance établie sur une longue période : les véhicules neufs consomment aujourd'hui 24 % moins d'essence qu'en 2008 (Bigg, 2018).

Quatre sources d'énergie potentielles pour les véhicules lourds et mi-lourds

Mais il n'y a pas que des véhicules personnels qui sillonnent chaque jour les routes du Canada. Quelle place occupent les nombreux camions de marchandises et de livraison et les autres véhicules de travail dans notre avenir carboneutre?

Pour certains segments du secteur du transport par véhicules lourds et mi-lourds, notre analyse révèle une trajectoire claire et cohérente vers la carboneutralité. Pour d'autres, l'avenir est moins clair. Comme c'est le cas pour les véhicules personnels, nous constatons que la plupart des véhicules en milieu urbain, comme les autobus ainsi que les camions et les camionnettes de livraison, devraient être électriques d'ici 2050²⁰. Cette transition est déjà commencée : on observe des essais de camions de livraison et d'autobus de transport en commun électriques, et leur adoption est en croissance partout au pays. Ces véhicules sont plus simples d'entretien et moins coûteux. Par ailleurs, le temps de recharge et l'autonomie, qui pourraient être des obstacles pour certaines applications, connaissent des avancées.

Pour les véhicules lourds et mi-lourds qui parcourent de longues distances, notre modèle indique quatre sources d'énergie potentielles dans une transition vers la carboneutralité : l'électricité, l'hydrogène²¹, les biocarburants et les combustibles fossiles compensés

par des émissions négatives²². Chacune de ces options pourrait fonctionner dans des créneaux précis ou sous des conditions optimales, mais chacune est aussi associée à des défis importants et à des coûts incertains; il est ainsi difficile de prédire laquelle dominera le marché.

Penchons-nous sur les véhicules de transport de marchandises (voir la figure 9). Dans certains des scénarios de carboneutralité examinés, les camions de marchandises à piles à combustible hydrogène représentent 64 % du marché d'ici 2050, mais seulement 36 % dans d'autres. Nous avons établi que les camions traditionnels pourraient représenter jusqu'à 42 % du marché en 2050, ou aussi peu que 22 %. Toutefois, dans une optique de carboneutralité, ces camions devraient être de plus en plus alimentés aux biocarburants (ils devraient l'être entièrement en 2050) ou aux combustibles fossiles compensés par des émissions négatives ailleurs²³. Bien que l'utilisation de camions entièrement électriques puisse être relativement limitée pour le transport de marchandises – le pourcentage projeté le plus élevé étant de 16 % du marché en 2050, principalement en raison des longues distances parcourues et de l'autonomie limitée des batteries –, la situation pourrait changer en cas d'avancées technologiques imprévues dans le domaine des batteries.

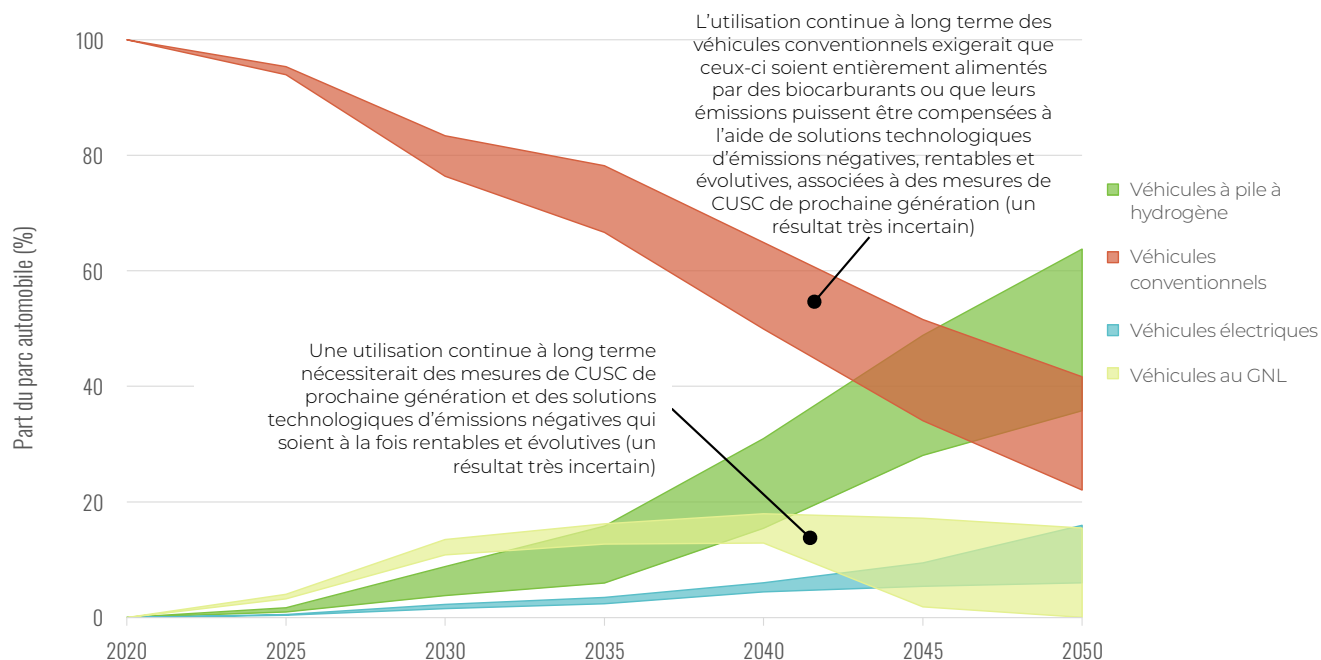
20 Le Canada compte d'ailleurs plusieurs fabricants d'autobus électriques, dont New Flyer au Manitoba, Lion Électrique au Québec et GreenPower en Colombie-Britannique.

21 Plus précisément, les camions de marchandises à hydrogène fonctionneraient avec des piles à combustible et une transmission électrique, avec ou sans batterie. On peut ainsi les considérer comme un type différent de véhicules électriques. De plus, dans certains cas, l'hydrogène servant à alimenter ces véhicules serait produit avec de l'électricité.

22 Les carburants de synthèse carboneutres produits à partir de dioxyde de carbone et d'hydrogène sont une autre possibilité pour le secteur du transport des marchandises (AIE, 2020b). Les coûts de production de ces carburants de synthèse sont actuellement élevés et ces carburants ne sont pas encore commercialisés; les coûts de production seraient moindres si l'hydrogène et l'électricité renouvelable étaient moins chers. Les carburants de synthèse comportent des avantages très intéressants pour le Canada (on peut notamment les raffiner et les distribuer à l'aide de l'infrastructure existante) ainsi que des répercussions sur l'utilisation du sol et les écosystèmes naturels grandement inférieures à celles des biocarburants. Par contre, la viabilité commerciale de ce type de carburants demeure incertaine.

23 L'utilisation à long terme de véhicules de marchandises au gaz naturel liquéfié (GNL) exigerait aussi une compensation par émissions négatives.

Figure 9 : Part totale du marché des différents types de véhicules utilisés pour le transport de marchandises au Canada, toutes trajectoires confondues



L'avenir réservé aux véhicules servant au transport de marchandises est incertain, mais il en est de même pour d'autres types de transport commercial. Dans certains de nos scénarios, le Canada atteint la carboneutralité dans le transport ferroviaire grâce à une transition vers des locomotives traditionnelles plus efficaces, alimentées soit par des biocarburants, soit par des combustibles fossiles avec compensation par émissions négatives. Dans d'autres scénarios, ce sont des piles à combustible hydrogène qui serviraient au transport ferroviaire des marchandises dans 64 % des cas. Les trains à hydrogène ou à biocarburant pourraient

également être transformés en modèles hybrides. Les trains au diesel sont déjà munis d'une transmission électrique, plus efficace et plus fiable pour le transport de marchandises très lourdes que la transmission mécanique. Ces trains sont généralement équipés de câbles électriques aériens dans beaucoup de régions du monde, et la même chose pourrait se faire au Canada pour les trains à piles à combustion hydrogène ou à biocarburant.

L'incertitude entourant la carboneutralité dans le secteur ferroviaire s'étend aussi aux secteurs aérien et maritime (voir l'encadré 8).

ENCADRÉ 8



Transport maritime et aérien

Au Canada, la réduction des émissions de GES dans les secteurs aérien et maritime est critique pour l'atteinte de la carboneutralité d'ici 2050. Ces secteurs ont généré environ 12 Mt d'émissions en 2018, soit moins de 2 % de la totalité des émissions du pays (ECCC, 2020b). Toutefois, ces chiffres ne tiennent pas compte de la libération d'émissions hors du pays par ces secteurs canadiens.

Les deux secteurs ont déjà réduit leurs émissions, et des politiques devraient contribuer à faire avancer les choses davantage. Par exemple, l'intensité énergétique en passager-kilomètre des avions commerciaux a diminué de plus de 70 % depuis les années 1960 (AIE, 2020c), mais les émissions totales n'ont cessé d'augmenter avec l'accroissement du transport commercial aérien (EESI, 2019). Le gouvernement du Canada (2016) estime que la réglementation à venir et les autres mesures visant à augmenter l'utilisation de carburants à faible teneur en carbone dans les secteurs maritime et aérien (et ferroviaire) pourraient contribuer à réduire les émissions de 1 à 2 Mt d'éq. CO₂ d'ici 2030. Le télétravail dans le contexte de la pandémie de COVID-19 pourrait aussi faire diminuer la demande à long terme pour les déplacements aériens, ce qui renverserait une tendance historique de croissance continue.

Le secteur maritime pourrait réduire ses émissions en adoptant des technologies existantes, et surtout, en améliorant l'efficacité énergétique et en faisant la transition vers des carburants renouvelables et de remplacement (Bows-Larkin, 2015; Gould et coll., 2009; IRENA, 2015). On pourrait moderniser la flotte actuelle ou encore intégrer les améliorations à la conception et à la construction de nouveaux navires. L'Organisation maritime internationale a récemment mis en œuvre une série de mesures visant à réduire les émissions de carbone dans le secteur, dont de nouvelles règles limitant le contenu en soufre des carburants (OMI, 2020). On fait actuellement l'essai de grands navires de marchandises alimentés par de l'ammoniac zéro carbone; l'ammoniac, composé d'hydrogène et d'azote, est entreposé sous forme liquide sur les bateaux.

Toutefois, malgré l'adoption des technologies disponibles, il demeure difficile de décrire précisément la trajectoire du secteur maritime vers la carboneutralité. Les coûts associés à l'amélioration de l'efficacité énergétique et à l'adoption de technologies de remplacement des

combustibles sont généralement élevés. Ces approches ne suffiraient pas non plus à atteindre la carboneutralité dans le secteur. À l'échelle internationale, le manque de possibilités pour la réduction des émissions dans le secteur maritime a encouragé certaines grandes entreprises à reporter leurs investissements dans la construction de nouveaux navires (The Economist, 2020).

Les obstacles liés aux coûts sont encore plus grands dans le secteur de l'aviation, où le développement de solutions de remplacement n'est pas encore aussi avancé (Bows-Larkin, 2015). Des carburants de remplacement sont explorés : carburants d'aviation durables, technologies électriques, hybrides ou solaires, hydrogène, etc. Toutefois, ces options pourraient se révéler rentables uniquement à long terme. La production des carburants de remplacement coûte aussi beaucoup plus cher que celle de carburéacteur; ainsi, l'utilisation de ces carburants dépendrait de solides politiques de soutien et d'importants investissements en capital (OACI, 2019). À plus court terme, des solutions opérationnelles et technologiques pourraient contribuer à améliorer l'utilisation du carburant et l'efficacité du service (AIE, 2020c).

La réduction substantielle des émissions dans les secteurs maritime et aérien étant limitée par des difficultés importantes, une certaine partie de leurs émissions pourrait devoir être compensée ailleurs. Les occasions techniques et opérationnelles étant particulièrement limitées dans le secteur de l'aviation, l'industrie mondiale s'est tournée vers les systèmes d'échange de quotas d'émission de GES pour obtenir des réductions nettes des émissions (Bows-Larkin, 2015). Les solutions à émissions négatives, si elles se révèlent rentables et utilisables à grande échelle, pourraient fournir au secteur une autre voie vers la carboneutralité.

L'hydrogène, les biocarburants, les véhicules électriques et les combustibles fossiles carboneutres sont des avenues prometteuses pour le secteur du transport de marchandises, mais chacune dépend de l'avancement de technologies émergentes, et dans certains cas, du développement d'une infrastructure dédiée. L'hydrogène offre économie et puissance, mais il requiert la création de nouvelles infrastructures de ravitaillement et demeure coûteux²⁴. Les biocarburants sont déjà utilisés dans le secteur des transports lourds, mais leur utilisation à grande échelle demeure incertaine en raison de la disponibilité des matières premières. Les camions de marchandises électriques ne sont pas encore bien adaptés au transport sur de longues distances. Enfin, les combustibles fossiles carboneutres pourraient être prometteurs, mais seulement si les technologies à émissions négatives

se révèlent rentables et utilisables à grande échelle, ce qui semble très peu probable à l'heure actuelle.

La technologie qui deviendra la norme dans le secteur du transport des marchandises sera déterminée à la fois par les politiques en vigueur et les avancées sur le marché. Des investissements publics massifs dans la production ou l'infrastructure de ravitaillement pour une solution en particulier pourraient stimuler d'autres investissements et ainsi encourager les économies d'échelle. Si un grand transporteur optait pour une solution et procédait à la transition de tous ses véhicules, d'autres transporteurs pourraient faire de même. Par ailleurs, des percées technologiques ou des décisions politiques ailleurs dans le monde pourraient avoir une incidence importante sur les coûts relatifs de technologies clés.

²⁴ Un projet de démonstration en cours en Alberta explore le potentiel de l'hydrogène pour les véhicules de marchandises, notamment par la mise en place d'un corridor muni d'infrastructures de ravitaillement (Emissions Reduction Alberta, 2020).

4.3 INDUSTRIES : NOTRE PRODUCTION

PRINCIPALES TRAJECTOIRES VERS LA CARBONEUTRALITÉ

- Il n'y a pas d'approche unique pour la transition du secteur industriel canadien vers la carboneutralité; les trajectoires de réduction des émissions y sont beaucoup plus incertaines et diverses que pour les secteurs du bâtiment et du transport.
- Dans tous les scénarios analysés, le secteur s'appuie en partie sur les émissions négatives pour atteindre la carboneutralité, parce que la réduction de certains types d'émissions industrielles à la source est très coûteuse. L'ampleur du recours aux solutions à émissions négatives dépendra de la viabilité de ces solutions.
- Le Canada continuerait de produire des ressources et des produits manufacturés le long de la trajectoire vers la carboneutralité, mais l'éventail des produits fabriqués ici et vendus à l'étranger évoluerait.
- Nous constatons que la production canadienne de pétrole et gaz ne peut être compatible avec la carboneutralité que si une combinaison très spécifique (et incertaine) de résultats et de conditions se réalise.

Les entreprises manufacturières canadiennes fournissent les biens essentiels à notre vie quotidienne, de l'énergie aux biens de consommation en passant par les matières premières, et stimulent le commerce international, qui vitalise notre économie. Elles fournissent également des emplois d'un bout à l'autre du pays. À l'heure actuelle, l'énergie utilisée dans le secteur industriel dépend principalement des combustibles fossiles : l'utilisation de carburants et les processus industriels de ce secteur libèrent la moitié des émissions du pays (soit 362 Mt d'éq. CO₂ par année). Les industries pétrolière et gazière, du raffinage de pétrole, du métal et de la production chimique sont les plus grands émetteurs.

La transformation du secteur industriel au Canada dans une optique de carboneutralité est un défi énorme. Chaque industrie devra trouver sa trajectoire en fonction des avancées technologiques et des dynamiques du marché à l'échelle mondiale, ainsi que

des politiques mises en place²⁵; même des processus industriels similaires pourraient nécessiter des trajectoires distinctes dans différentes régions du pays. De façon générale, notre analyse montre que la trajectoire du secteur industriel est beaucoup plus difficile à prévoir que celle d'autres secteurs de l'économie.

Quelle que soit la trajectoire exacte que suivra le Canada vers la carboneutralité, notre modèle prévoit que le pays restera un grand producteur de ressources, fabricant de produits manufacturés et fournisseur de services de pointe. Une exception : le secteur pétrolier et gazier. Nous constatons que la production canadienne de pétrole et de gaz ne peut être compatible avec la carboneutralité que si une combinaison très spécifique (et incertaine) de résultats et de conditions se réalise - plusieurs de ceux-ci étant très incertains, sans parler du fait qu'ils échappent au contrôle du Canada. En même temps, les marchés croissants

²⁵ Les politiques et les marchés étrangers pourraient être plus déterminants que la situation nationale dans la transition vers la carboneutralité des industries productrices de biens et de services échangés sur le commerce international.



de l'énergie, des matériaux, des produits chimiques et des services sobres en carbone ouvriront de nouvelles avenues aux entreprises et aux travailleurs canadiens dans des secteurs émergents et existants, qui pourront faire profiter le Canada et le reste du monde de leurs produits et de leur expertise.

La réduction des émissions industrielles est moins claire que pour les bâtiments ou les transports

Il n'existe assurément pas de solution unique pour le secteur industriel canadien²⁶. Dans tous les scénarios examinés, il n'y a que 36 % des réductions en émissions d'ici 2030, et 26 % d'ici 2050, qui sont attribuables à un même groupe de technologies et d'interventions (voir la figure 10). Les solutions qui ressortent systématiquement dans l'ensemble de nos scénarios sont entre autres la gestion du méthane, le CUSC, l'électrifica-

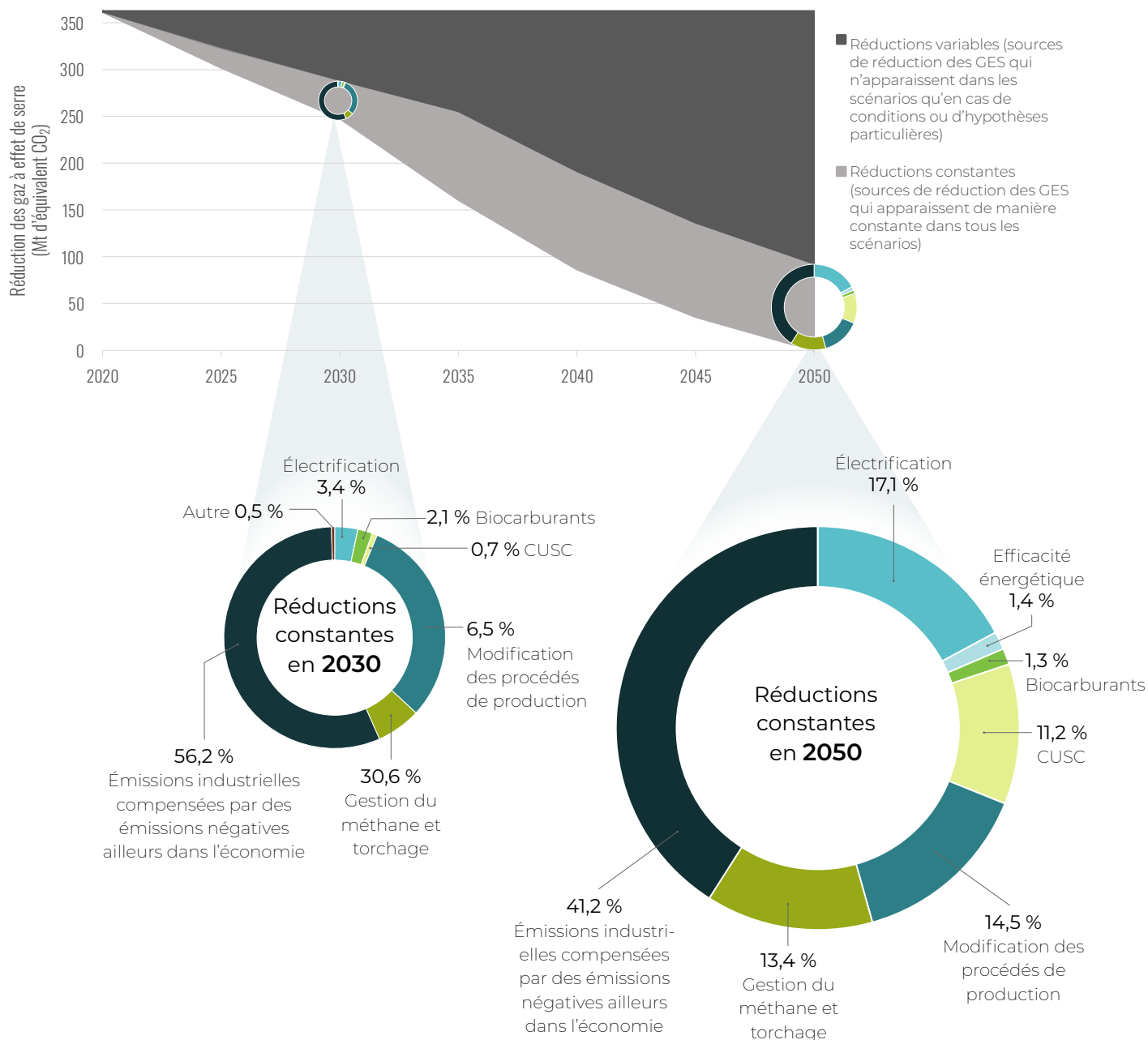
tion, l'efficacité énergétique et les changements aux procédés de production, comme l'utilisation de l'électricité pour le recyclage de l'acier.

Notre analyse indique que la transition de l'industrie lourde vers la carboneutralité serait vraisemblablement coûteuse. La carboneutralité au Canada ne signifie pas nécessairement qu'un secteur en particulier deviendra carboneutre. Puisque tous nos scénarios considèrent un recours au moins partiel aux émissions négatives, il pourrait subsister certaines émissions « brutes » (nous y revenons à la section 4.4). Selon l'ensemble de nos scénarios, 20 % des émissions de l'industrie lourde sont toujours enregistrées en 2030 et environ 11 % le sont en 2050²⁷. Les coûts élevés associés à la décarbonisation complète de certains procédés de production industriels (la production de ciment, par exemple) et au retrait de certaines installations à forte intensité d'émissions sont des facteurs clés.

²⁶ Dans le présent rapport, le secteur industriel canadien comprend l'agriculture, la foresterie, l'exploitation minière, le pétrole et le gaz, la fabrication automobile, les produits chimiques, l'hydrogène, les biocarburants, le métal, le papier et les autres secteurs manufacturiers.

²⁷ Le secteur pourrait également générer une certaine quantité d'émissions négatives en procédant à la combustion de GNR pour produire de l'énergie dans les installations industrielles, puis en stockant les émissions grâce à des technologies de CUSC. Lorsque les émissions produites par la combustion du GNR, au cycle de vie carboneutre, sont captées, les émissions nettes globales deviennent négatives, ce qui permet de compenser d'autres émissions, ou même de vendre des crédits à d'autres installations ou activités d'exploitation.

Figure 10 : Solutions de réduction des émissions présentes dans tous les scénarios ou seulement dans certains, pour le secteur industriel





Dans une optique de carboneutralité, la persistance des émissions de l'industrie lourde particulièrement coûteuses à réduire ou à capter à la source dépend de la disponibilité de solutions à émissions négatives pour compenser ces émissions. Dans tous nos scénarios, nous considérons que certaines solutions naturelles à émissions négatives seront accessibles. Néanmoins, dans certains, nous considérons aussi que des solutions techniques à émissions négatives se révéleront rentables et utilisables à grande échelle.

Dans les scénarios où ces technologies ne sont ni rentables ni utilisables à grande échelle, les émissions excédentaires du secteur industriel sont éliminées grâce à diverses technologies, comme une utilisation plus intelligente de l'électrification des procédés de production, le CUSC, le déploiement à grande échelle de solutions autrement marginales (les biocarburants, par exemple) et des changements structuraux qui « déplacent » la production vers des sous-secteurs qui génèrent moins d'émissions.

Au contraire, dans les scénarios où les solutions techniques à émissions négatives sont rentables et utilis-

ables à grande échelle, elles ont tendance à occuper une très grande place; ainsi, une minorité des émissions excédentaires du secteur industriel doit être réduite à la source. Dans ces scénarios, les solutions à émissions négatives permettent aussi de maintenir les méthodes de production générant beaucoup d'émissions, ce qui évite les changements importants et coûteux aux procédés de production. Le secteur industriel pourrait-il réellement bénéficier des solutions techniques à émissions négatives? Quel serait le prix à payer? Beaucoup d'inconnues demeurent.

L'incertitude qui entoure les trajectoires que suivra le secteur industriel est d'autant plus grande qu'on ne connaît pas encore le coût de certaines technologies. Par exemple, dans un scénario où le CUSC deviendrait relativement coûteux, les biocarburants auraient tendance à être davantage utilisés pour la génération de chaleur de haute température. Au contraire, si le coût des biocarburants était élevé, le CUSC pour la combustion de combustibles fossiles aurait tendance à occuper une plus grande place²⁸.

28 Si les deux types de technologies étaient rentables, elles pourraient souvent être utilisées ensemble pour générer des émissions négatives.

Le Canada continuera à produire des ressources et des produits manufacturés

Même si les industries seront contraintes de réduire considérablement leurs émissions et si la production industrielle canadienne changera beaucoup durant la transition vers la carboneutralité, le Canada lui-même et le reste de la planète continueront d'avoir besoin d'un grand nombre de ressources et de produits d'ici.

Dans tous les scénarios analysés, les secteurs des ressources naturelles, dont l'agriculture, la foresterie et l'exploitation minière, sont en croissance continue, tout comme les secteurs manufacturiers, dont l'automobile, les produits chimiques, l'acier, le ciment, l'hydrogène, les biocarburants, les métaux et le papier (voir la figure 11 et la figure 12). Notre modèle dresse un portrait différent du secteur pétrolier et gazier, que nous décrivons plus loin.

Figure 11 : Production de ressources, toutes trajectoires confondues*

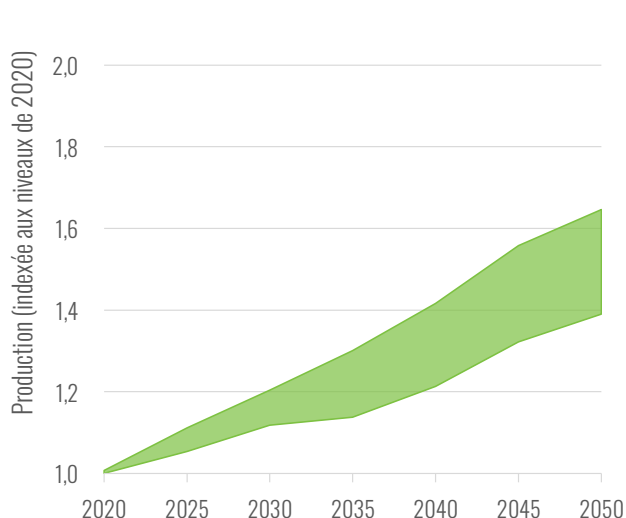
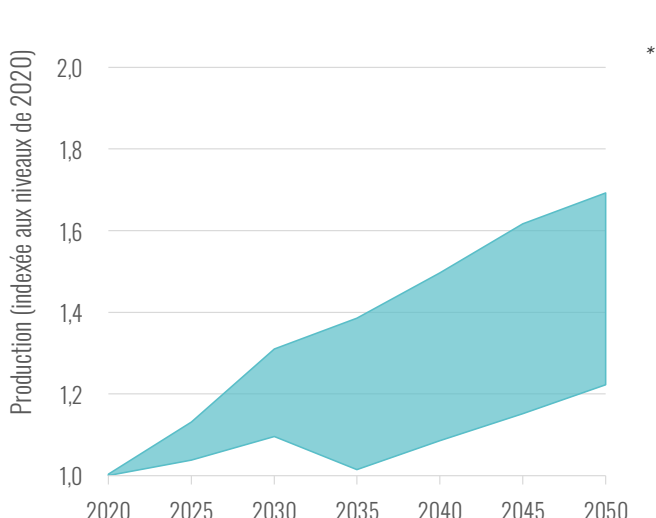


Figure 12 : Production manufacturière à travers les trajectoires vers la carboneutralité**



*Cette figure représente la production de ressources dans les secteurs de l'agriculture, de la foresterie et de l'exploitation minière (le secteur pétrolier et gazier canadien, dont il est question plus loin, n'y est pas représenté).

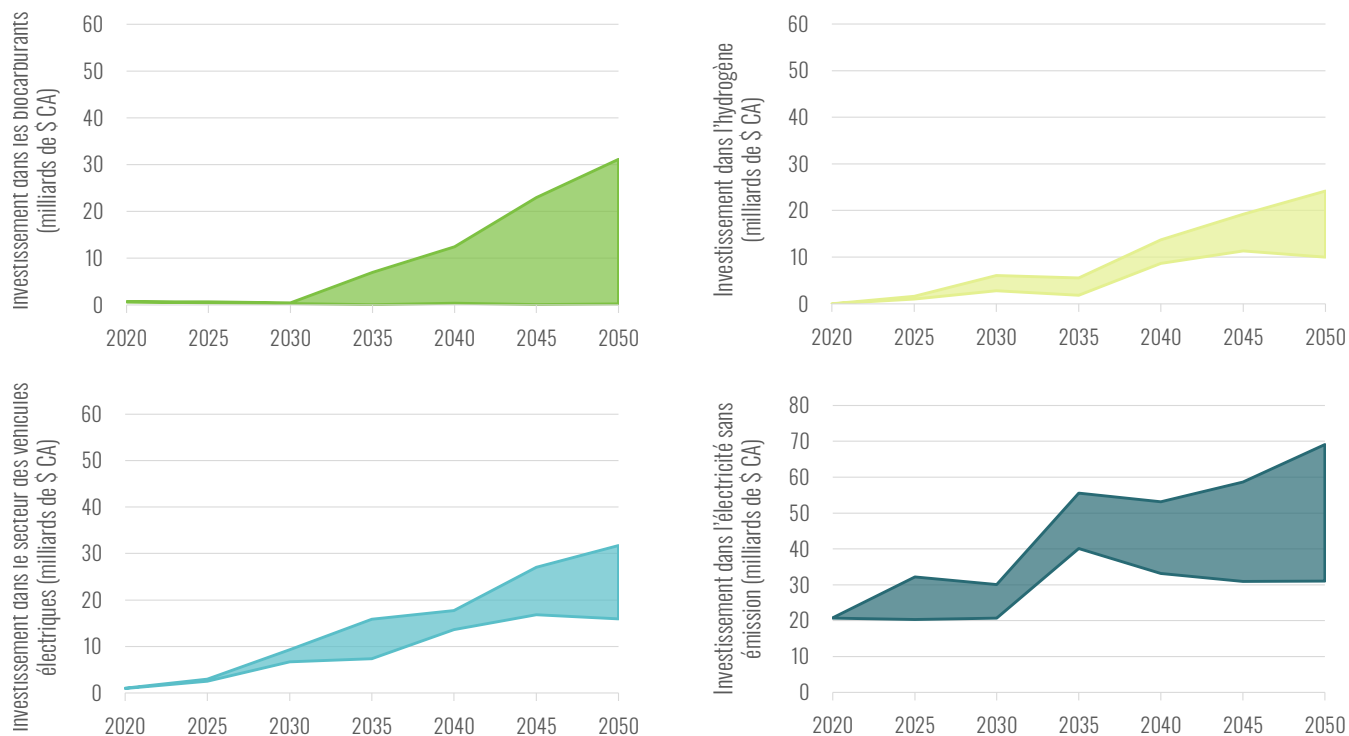
**Cette figure représente la production manufacturière dans les secteurs de l'automobile, des produits chimiques, de l'acier, du ciment, de l'hydrogène, des biocarburants, des métaux, du papier, entre autres.

Certains sous-secteurs industriels auraient une croissance particulièrement importante dans la transition vers la carboneutralité. Notre modèle indique que les technologies et les produits qui auront une importance centrale pour la transition vers la carboneutralité deviendraient eux-mêmes des sphères de croissance industrielle de premier plan, comme le montrent les trajectoires d'investissements dans l'hydrogène, le véhicule électrique, les biocarburants et l'électricité propre (voir la figure 13).

Dans les scénarios où le reste du monde lutte de plus en plus activement contre les changements climatiques, on verrait une croissance particulièrement importante de certaines sphères du secteur industriel canadien. Par exemple, selon notre analyse, les investissements dans les biocarburants atteindraient leur maximum si d'autres pays posaient des actions concrètes pour lutter contre les changements climatiques, ce qui stimulerait la demande mondiale, augmenterait les prix et rendrait

la production nationale plus compétitive. En outre, des actions climatiques mondiales d'envergure donneraient un élan non seulement aux secteurs de technologies propres en émergence, mais aussi à des sous-secteurs industriels canadiens. Par exemple, le Canada est un grand producteur de beaucoup des minéraux nécessaires à la fabrication de technologies vitales dans une économie sobre en carbone, comme les véhicules électriques, les panneaux solaires et les éoliennes. La position du pays est aussi avantageuse en matière d'approvisionnement en plomb, en zinc, en cuivre et en or pour l'industrie solaire, en cobalt, en graphite et en nickel pour la fabrication de batteries, et en aluminium à faible émission dans les industries de l'automobile, du transport et de la construction (RNCAN, 2017; RNCAN, 2019b; AIE, 2020d). Au fil de la décarbonisation mondiale, le Canada pourrait également avoir l'occasion d'exporter son savoir-faire et ses services technologiques vers d'autres pays, notamment dans les secteurs du bâtiment, du transport et de l'électricité (voir l'encadré 3).

Figure 13 : Investissements nationaux dans les secteurs des technologies propres, toutes trajectoires confondues



**Dans ces chiffres, les investissements comprennent les dépenses en biens qui seront utilisés pour produire d'autres biens et services à l'avenir ainsi que les dépenses des ménages en technologies d'énergie propre.*



Le marché mondial des technologies propres devrait dépasser 2,5 billions de dollars d'ici 2022 (Table de stratégies économiques sur les technologies propres, 2019). Le Canada a la possibilité de prospérer sur ce marché florissant, puisque son secteur des technologies propres génère déjà 17 milliards de dollars par année et est bien positionné sur la scène internationale (4e sur 40 pays, selon le Global Cleantech Innovation Index de 2017). La Chine et les États-Unis se sont déjà montrés particulièrement intéressés par les technologies propres canadiennes (EDC, 2020).

Les tendances d'exportation des technologies propres canadiennes sont déjà prometteuses. Par exemple, entre 2014 et 2019, ces exportations ont grimpé de 9,7 % par année (trois fois le taux de croissance de l'ensemble des exportations canadiennes pour la même période). Les principaux secteurs sont les combustibles propres, les minéraux de terres rares, les technologies d'énergie propre, de décarbonisation industrielle et de transport écologique, et l'équipement écoénergétique (Sawyer, 2020).

Le secteur du pétrole et gaz canadien sont confrontés à un avenir précaire

La production pétrolière et gazière (principalement destinée à l'exportation²⁹) est la plus grande source d'émissions au Canada : elle représente à l'heure actuelle 26 % des émissions totales du pays (ECCC, 2019b). Bien que des améliorations dans l'intensité des émissions de la production puissent entraîner des réductions,

la hausse et la chute des émissions globales sont principalement associées à la fluctuation des niveaux de production.

Selon notre analyse, quelles que soient les politiques climatiques du Canada, la production pétrolière et gazière sera avant tout influencée par les tendances mondiales. Des facteurs tels que l'augmentation des ventes de véhicules électriques ou des volumes de production élevés à l'étranger pourraient faire diminuer les prix et entraîner un ralentissement de la croissance de production, ou même un déclin, au pays. Les politiques climatiques des autres pays pourraient réduire la demande mondiale en combustibles fossiles, et par extension, les prix. Comme ces facteurs sont entièrement hors du contrôle du Canada, le secteur pétrolier et gazier pourrait faire face à des défis considérables, indépendamment des choix faits ici.

Notre modèle indique que dans les scénarios où les prix du pétrole et du gaz chuteraient de façon importante en raison de changements dans les conditions du marché ou les politiques climatiques mondiales (ou les deux), la production (et les émissions) au Canada diminuerait considérablement. Dans un scénario où les prix du pétrole seraient bas, c'est-à-dire que le prix du baril à l'échelle mondiale atteindrait 38 \$ US en 2030 et jusqu'à 36 \$ US en 2050³⁰, la production pétrolière au Canada baisserait de 89 à 96 % d'ici 2050, et la production de gaz naturel, de 56 à 74 % (voir la figure 14 et la figure 15).

29 Au Canada, 81 % du pétrole brut et 45 % du gaz naturel sont exportés (RNCAN, 2020c; RNCAN, 2020d).

30 À titre informatif, le prix du baril de pétrole se situait autour de 40 \$ en 2020.

Figure 14 : Production pétrolière au Canada en fonction des prix du pétrole à l'échelle mondiale, toutes trajectoires confondues

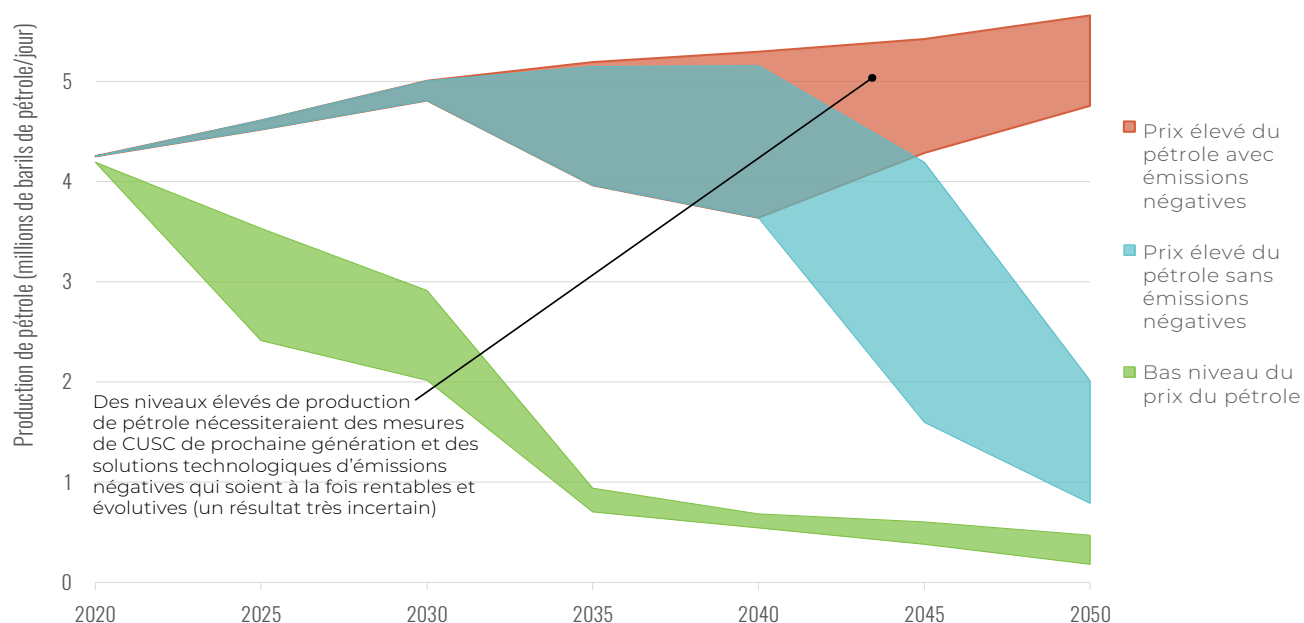
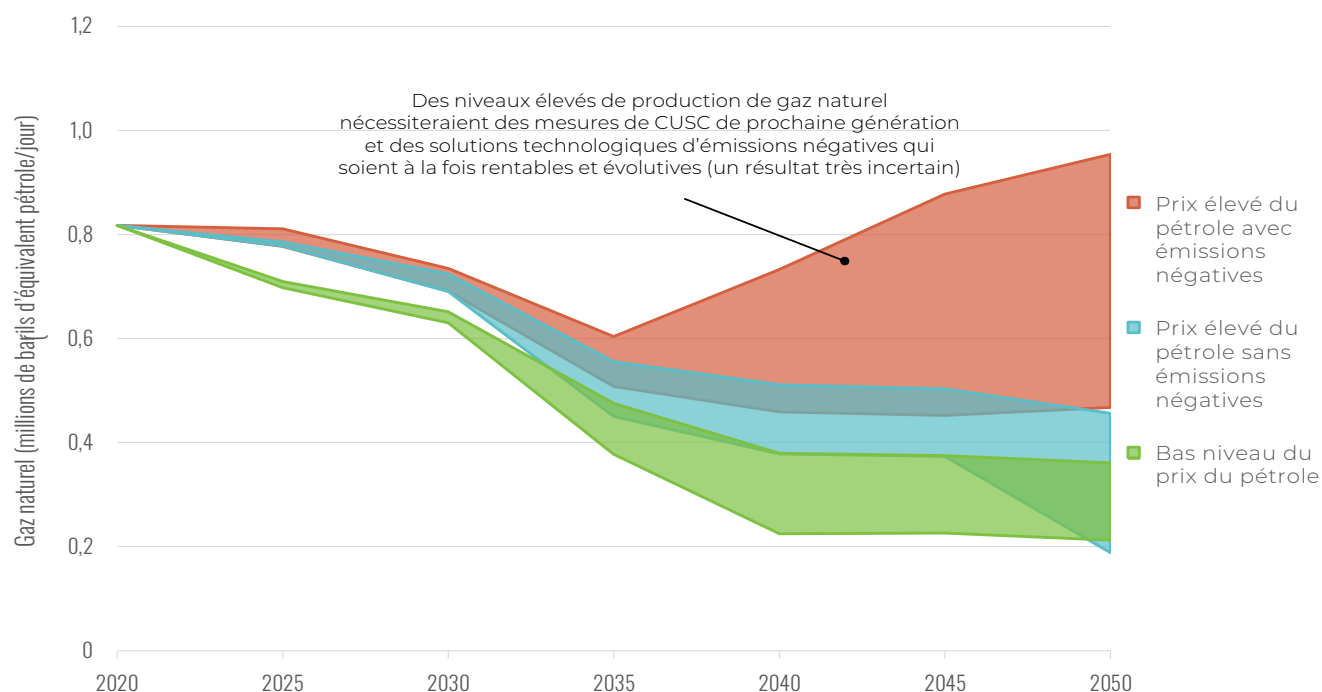


Figure 15 : Production de gaz naturel au Canada en fonction des prix du pétrole à l'échelle mondiale, toutes trajectoires confondues*



* Notre modèle s'appuie sur les prix du pétrole à l'échelle mondiale pour représenter ceux du gaz naturel, comme ils ont tendance à correspondre.

La production pétrolière (et les émissions) au Canada subirait une baisse importante dans tout scénario où les prix du pétrole dans le monde demeurent bas. Si les faibles coûts variables de la production pétrolière au Canada permettent aux producteurs de traverser les périodes où les prix sont bas, les coûts fixes élevés signifient qu'il n'est pas possible de maintenir de hauts niveaux de production si les prix demeurent bas à moyen et à long terme. Ces enjeux seraient aussi exacerbés en présence de politiques climatiques mondiales stimulant la chute des prix; en effet, l'adoption par d'autres pays de politiques favorisant le pétrole sobre en carbone placerait une bonne partie de la production pétrolière canadienne en mauvaise posture face à la concurrence. Il lui serait aussi plus difficile, dans un tel environnement, de diminuer l'intensité de ses émissions pour être plus concurrentielle puisque les marges réduites des producteurs limiteraient le capital disponible pour faire les investissements nécessaires et compliqueraient l'obtention de financement (Jaccard et coll., 2018).

En nous appuyant sur l'ensemble de nos scénarios, nous constatons que les niveaux de production de pétrole et de gaz au Canada ne pourraient rester stables ou augmenter dans une trajectoire vers la carboneutralité que si une série de conditions très précises étaient réunies. Il faudrait que les prix mondi-

aux augmentent et demeurent élevés (nos scénarios de prix élevés prévoient une augmentation du baril de pétrole à 63 \$ US d'ici 2030 et à 87 \$ US d'ici 2050). Il faudrait également avoir confiance que les prix suivront cette tendance³¹. Parallèlement, les producteurs de pétrole et de gaz devraient investir massivement dans la réduction des émissions de production, et ce, en utilisant les solutions existantes et en développant des technologies supérieures³². Il faudrait aussi que les technologies qui en sont à l'étape de la démonstration, comme le CUSC pour les flux de gaz de combustion non concentrés et les solutions techniques à émissions négatives, se révèlent rentables et utilisables à grande échelle, une issue très incertaine.

En d'autres mots, pour que la production pétrolière et gazière au Canada puisse s'inscrire dans un objectif de carboneutralité, il faudrait que la production soit carboneutre et que la demande internationale ne s'essouffle pas (ni les attentes à cet égard). Pour que la production soit carboneutre, il faudrait qu'à l'échelle nationale, les technologies à émissions négatives et le CUSC de prochaine génération soient adaptés pour être utilisables à grande échelle tout en étant rentables (une éventualité peu probable, comme nous le décrivons à la section 4.4)³³. Et pour maintenir la demande internationale, il faudrait que les solutions techniques à émis-

31 Les producteurs de pétrole canadiens et leurs prêteurs devraient être persuadés que les dépenses d'investissement dans les mesures qui réduisent les émissions de production et qui maintiennent ou accroissent la capacité de production globale du Canada (par la création de nouveaux projets ou l'expansion des activités si la production diminuait) offriraient un rendement du capital investi à long terme.

32 Les hypothèses de nos scénarios varient quant au degré de réduction dans l'intensité des émissions qui pourraient survenir au fil du temps dans le secteur des sables bitumineux au Canada. Nous utilisons des cas de référence du modèle gTech de même que des projections de l'Association canadienne des producteurs pétroliers. Nous constatons que même avec une réduction plus importante de l'intensité des émissions dans le secteur, il n'y a pas d'effet sur nos observations relatives à la compatibilité de la production pétrolière et gazière canadienne avec l'objectif de carboneutralité.

33 Si les solutions techniques à émissions négatives ne peuvent être utilisées, mais les solutions de CUSC de deuxième génération oui, la production pétrolière canadienne pourrait rester concurrentielle dans le contexte de la transition du Canada vers la carboneutralité et possiblement trouver des débouchés à l'étranger – mais seulement si les prix étaient suffisamment élevés (et qu'on s'attendait à ce qu'ils le soient) et s'il y avait assez d'améliorations en matière d'intensité des émissions. Cette situation pourrait se voir uniquement dans un scénario où d'autres grandes économies prendraient beaucoup de retard sur le Canada en matière de politiques climatiques. Certains pays pourraient ne pas adopter le CUSC pour compenser la combustion continue de combustibles fossiles, comme notre analyse indique que cette technologie serait économique seulement dans certaines sphères de l'industrie. Pour qu'il y ait une demande mondiale importante et soutenue en pétrole et en gaz dans ce scénario, il faudrait que les secteurs du bâtiment et du transport des personnes à l'échelle de la planète continuent d'utiliser ces ressources, ce qui indiquerait que peu de mesures climatiques sont prises à l'étranger et que la planète est en voie de dépasser la limite de réchauffement climatique établie à 1,5 °C. Par ailleurs, si ni les solutions techniques à émissions négatives ni les solutions de CUSC de deuxième génération ne peuvent être utilisées, mais que des solutions naturelles suffisamment rentables et utilisables à grande échelle sont disponibles au Canada, la production pétrolière et gazière au pays pourrait alors trouver des débouchés à l'étranger – mais, encore une fois, seulement si les prix étaient suffisamment élevés (et qu'on s'attendait à ce qu'ils le soient) et s'il y avait assez d'améliorations en matière d'intensité des émissions. Dans ce scénario, il faudrait également que d'autres pays soient en retard sur le Canada en matière de politiques climatiques. Selon notre analyse, l'utilisation de solutions naturelles à émissions négatives pour compenser les émissions des secteurs du bâtiment et du transport des personnes ne serait pas rentable. Ainsi, dans ce scénario, une demande mondiale soutenue découlerait de retards dans les politiques climatiques et la planète dépasserait vraisemblablement la limite de réchauffement établie à 1,5 °C.

sions négatives soient utilisées à l'étranger³⁴ ou que les efforts internationaux visant à freiner les changements climatiques échouent, ce qui entraînerait potentiellement des répercussions dramatiques en matière de climat au Canada et ailleurs.

Si ces conditions se concrétisaient, une trajectoire potentielle permettrait au secteur pétrolier et gazier canadien de rendre sa production carboneutre tout en restant concurrentiel. De plus, notre modèle prévoit que la demande en pétrole canadien ferait alors grimper la production de 30 % d'ici 2050 (voir la figure 14). La production de gaz naturel suivrait une trajectoire différente (voir la figure 15) : elle subirait un déclin de 26 % jusqu'en 2035 avant de rebondir

jusqu'en 2050, atteignant un niveau 17 % plus élevé que les projections actuelles, et ce, dans le contexte où le CUSC et les solutions techniques à émissions négatives seraient de plus en plus déployés dans le secteur.

Ces éventualités sont cependant loin d'être garanties et dépendent d'un certain nombre de facteurs hors du contrôle du Canada. En outre, bien que certains scénarios indiquent que les réserves de combustibles fossiles canadiens pourraient servir de matières premières pour la production de produits pétrochimiques ou d'autres nouveaux matériaux ou produits, l'application à grande échelle de cette approche n'est pas non plus garantie.



Pour que la production canadienne de pétrole et de gaz soit compatible avec un objectif de carboneutralité, il faudrait à la fois une production à zéro émission nette et une demande mondiale robuste de combustibles fossiles à long terme (ainsi que des attentes d'une demande robuste).

³⁴ Seuls quelques pays ont les caractéristiques géologiques nécessaires pour capter de grandes quantités de CO₂. Ainsi, pour qu'un scénario dans lequel d'autres pays compenseraient leur consommation de combustibles fossiles par des émissions négatives se concrétise, il faudrait que ces pays aient opté pour cette approche et qu'ils soient en mesure de le faire grâce à un régime d'échange mondial établi en vertu de la CCNUCC qui inclurait les émissions négatives.

Les facteurs affectant la production canadienne de pétrole et de gaz sur la voie de la carboneutralité

Environnement canadien

Prix attendus du pétrole

Les sociétés pétrolières et gazières canadiennes et leurs prêteurs **s'attendent-ils à des prix élevés** qui justifient ainsi les investissements dans les capacités de production ?

Oui

Non

Intensité des émissions de la production

Les sociétés pétrolières et gazières canadiennes peuvent-elles investir de façon à **réduire l'intensité des émissions** de leur production ?

Oui

Non

Possibilité d'émissions négatives

Des technologies comme la capture atmosphérique directe et le CUSC avancé sont-elles **rentables, utilisables à grande échelle** et largement déployées au Canada ?

Oui

Non

Environnement mondial

Compensation dans le monde

D'autres pays misent-ils sur les émissions négatives à l'échelle pour **compenser les émissions** découlant du maintien de leur consommation de combustibles fossiles ?

Oui

Non

Politiques climatiques dans le monde

Les autres grandes économies du monde accusent-elles beaucoup de retard par rapport au Canada en matière de politiques climatiques, **continuant donc de consommer des combustibles fossiles** et d'accélérer le changement climatique ?

Oui

Non

Production importante soutenue à long terme

Baisse importante de la production avec le temps

ENCADRÉ 9



Diversification économique dans les provinces productrices de pétrole du Canada

Les trajectoires examinées varient grandement quant au nombre de changements structurels qu'elles provoqueraient dans l'économie canadienne (nous y reviendrons à la section 5.2) et leurs répercussions régionales. De façon générale, c'est la transition de secteurs à forte intensité de carbone vers d'autres à faible intensité qui aurait la plus grande incidence sur les régions productrices de pétrole au Canada. Or, un déclin dans les secteurs à forte intensité de carbone pourrait survenir, quelles que soient les politiques climatiques instaurées au pays.

Certains des secteurs qui devraient croître dans une transition vers la carboneutralité sont cependant compatibles avec l'infrastructure, les ressources et le savoir-faire des provinces canadiennes productrices de pétrole et représentent des sphères de croissance potentielle pour ces régions, comme l'hydrogène, les biocarburants et l'électricité.

La production d'hydrogène est l'un des secteurs émergents les plus prometteurs pour l'Alberta et la Saskatchewan dans la transition vers la carboneutralité. Pour tous les scénarios considérés, notre modèle indique que les investissements dans le secteur de l'hydrogène entraîneraient une progression constante dans les deux provinces entre 2020 et 2050. De plus, comme notre modèle ne décrit probablement pas le plein potentiel de l'hydrogène, les retombées pourraient être encore plus importantes que prévu. Cette nouvelle industrie aura également besoin d'une main-d'œuvre spécialisée, et beaucoup de travailleurs du secteur pétrolier et gazier détiennent déjà les compétences nécessaires (par exemple, construction d'installations de reformage

du méthane à la vapeur et de CUSC pour produire de l'hydrogène bleu, construction de pipelines de CO₂, et conversion de champs de pétrole et de puits orphelins en installations servant à l'élimination de CO₂ ou à la production d'hydrogène). L'hydrogène pourrait aussi représenter une occasion prometteuse d'exportation pour ces régions. L'industrie pétrolière et gazière canadienne se positionne déjà comme plus grande productrice d'hydrogène au pays; des entreprises comme Shell produisent de l'hydrogène et utilisent le CUSC pour réduire leurs émissions.

Les régions productrices de pétrole peuvent également saisir les occasions grandissantes dans le secteur des biocarburants projetées par notre modèle en modifiant leur équipement de façon à produire ce type de carburant. Les raffineries peuvent être converties en installations de production de biocarburants, comme Phillips 66 prévoit de le faire aux États-Unis, et les entreprises pétrolières peuvent construire et exploiter de nouvelles installations, comme Suncor et Husky le font aujourd'hui (Phillips 66, 2020; Suncor, 2020; Husky Energy, 2020).

Parmi les autres secteurs ayant un potentiel de croissance, mentionnons l'exploitation du lithium et de l'uranium, la production de batteries, les petits réacteurs modulaires et l'énergie géothermique. Les solutions à émissions négatives pourraient aussi présenter des avenues intéressantes (voir la section 4.4.).

Cependant, les emplois et les compétences ne sont pas automatiquement interchangeables d'un secteur à l'autre. De nombreux travailleurs pourraient ne pas détenir la formation spécialisée en science, en ingénierie ou en gestion des opérations nécessaire dans certains secteurs émergents sobres en carbone (Thirgood et coll., 2017). Par exemple, dans tous nos scénarios, les secteurs de l'hydrogène, des biocarburants et de l'électricité ont besoin de plus en plus de main-d'œuvre, mais certains postes exigent des compétences spécialisées. Il faudra porter une attention particulière à l'éducation et à la formation pour régler ce type de problèmes potentiels.

La transition vers la carboneutralité risque d'occasionner des perturbations économiques, sociales et culturelles, ou d'aggraver la situation, pour les travailleurs et les collectivités, surtout ceux qui dépendent des secteurs à fortes émissions. Mais il y aura d'autres embûches. Même les trajectoires vers la carboneutralité qui entraînent le moins de changements structuraux pourraient modifier grandement le portrait de l'emploi en raison de vastes tendances mondiales, comme la modification de la demande et l'automatisation. Les gouvernements devront absolument élaborer des politiques pour atténuer les répercussions sur les travailleurs et les collectivités, et créer des occasions qui leur permettront de participer à la transition, voire de la mener (Phanord-Cadet et coll., 2018).

4.4 ÉMISSIONS NÉGATIVES : POUR L'ATTEINTE DE LA NEUTRALITÉ

PRINCIPALES TRAJECTOIRES VERS LA CARBONEUTRALITÉ

- Les solutions à émissions négatives, naturelles ou techniques, viendraient s'ajouter à d'autres solutions, comme l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables et l'électricité. Si elles se révélaient viables, elles pourraient changer drastiquement la trajectoire du Canada vers la carboneutralité et les futurs systèmes énergétiques.
- Les solutions naturelles pourraient jouer un rôle important, mais elles entrent en conflit avec d'autres priorités d'utilisation du sol. Il faudrait également que les peuples autochtones prennent part au déploiement de ces solutions, comme celui-ci se ferait sur des terres pour lesquelles ils détiennent des droits inhérents. Toutefois, des questions subsistent quant à la complémentarité et à la pérennité réelles de ces types d'émissions négatives.
- Les solutions techniques à émissions négatives présentent un potentiel énorme, mais l'ampleur de leur contribution à la cible de carboneutralité du Canada reste très incertaine.

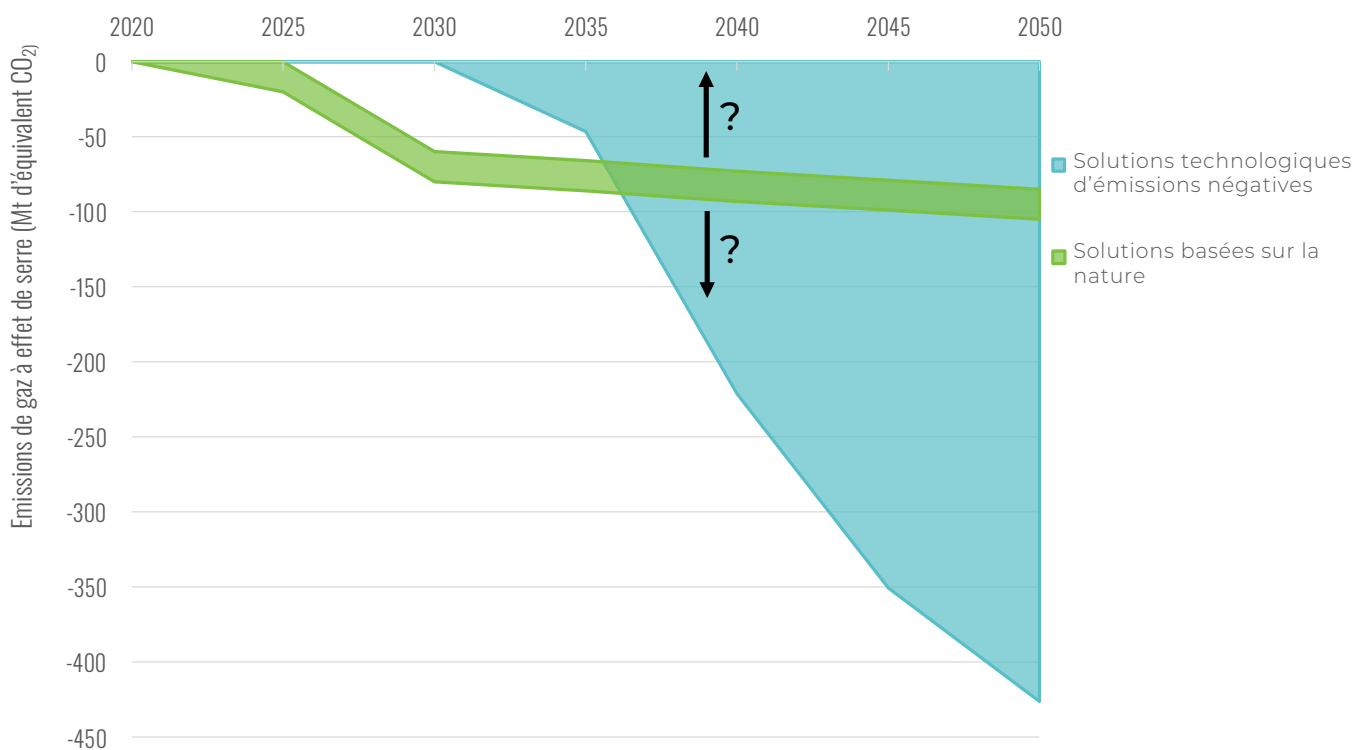
Les émissions négatives ne sont pas un luxe : elles sont nécessaires dans la lutte mondiale contre les changements climatiques. Le *Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C* fait valoir le besoin d'atteindre la cible de zéro émission nette de CO₂ d'ici 2050, mais aussi d'arriver à des émissions négatives nettes d'ici 2100, selon la rapidité de l'atteinte de la carboneutralité dans le monde (Hoegh-Guldberg et coll., 2018). La plupart des évaluations mondiales relatives à la cible de 1,5 °C indiquent que les émissions négatives nettes feront partie de la transition d'ici les années 2030.

Le Canada pourrait aussi avoir besoin d'émissions négatives pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050. Une part des émissions canadiennes pourrait être extrêmement difficile et coûteuse à réduire, soit parce que le stock de capital existant (infrastructure, usines, bâtiments, véhicules lourds) a une grande longévité, soit parce que les solutions de remplacement quasi carboneutres ne seront pas disponibles avant un certain temps, et pourraient ne jamais l'être. Les émissions négatives pourraient contribuer à neutraliser certaines de ces sources d'émissions continues, ce qui aiderait le Canada à atteindre sa cible.

Comme nous l'avons expliqué à l'encadré 4, ces émissions négatives pourraient être le résultat de solutions naturelles, comme la plantation d'arbres, la modification des pratiques agricoles et le retour de terres agricoles marginales à l'état sauvage, ou de solutions techniques, comme la combustion de la biomasse et le captage direct du CO₂ dans l'air combiné au CUSC.

Selon les scénarios analysés, il y a une variation importante dans la contribution potentielle des émissions négatives. Comme nous le voyons à la figure 16, notre modèle prévoit une adoption très variable des solutions techniques à émissions négatives, en raison de l'incertitude actuelle entourant leur rentabilité et leur utilisation à grande échelle. En comparaison, l'étroitesse de la bande correspondant aux solutions naturelles traduit surtout le manque d'estimations fiables de leur potentiel, la tendance d'adoption de ces solutions étant stable et constante dans les scénarios que nous avons considérés. Nous traitons des solutions naturelles et techniques à émissions négatives dans les lignes qui suivent.

Figure 16 : Grande incertitude entourant le potentiel de solutions naturelles et techniques à émissions négatives, toutes trajectoires confondues



Les données servant à modéliser le potentiel technique de la séquestration des GES grâce à des solutions naturelles sont tirées d'une analyse en cours de Nature United. Le potentiel représenté par la figure pourrait être sous-estimé, parce que l'analyse de Nature United tient compte uniquement des effets des interventions naturelles qui surviendraient d'ici 2030 (dont certaines continueraient à séquestrer des GES au-delà de 2030, puisque la biomasse continuera de croître et de séquestrer du carbone). Le potentiel pourrait aussi être surestimé en raison de la complexité et des obstacles associés à la réalisation d'interventions naturelles à grande échelle, ainsi que de la difficulté à prouver leur complémentarité et leur pérennité (voir l'encadré 10).



Les solutions fondées sur la nature pourraient grandement contribuer à compenser les émissions de secteurs où elles sont très complexes ou coûteuses à réduire à la source.

Des opportunités existent au niveau des solutions basées sur la nature, mais leur mise en œuvre peut être difficile

Les solutions naturelles à émissions négatives ont un potentiel énorme pour la séquestration des GES à faible coût dans les forêts, les prairies, les milieux humides et les terres agricoles³⁵. Les vastes terres émergées du Canada présentent un potentiel considérable pour ce type de solutions. Dans notre analyse, nous prévoyons que les solutions naturelles contribueraient à compenser les émissions de GES dans des secteurs où elles sont très complexes ou coûteuses à réduire, comme c'est le cas pour les processus industriels à fortes émissions servant à créer des matériaux essentiels, comme le ciment.

La concrétisation de ces solutions serait toutefois loin d'être simple. En premier lieu, il y a la question des crédits pour la séquestration de GES. Le Canada a déjà un peu d'expérience en la matière : des inventaires nationaux de GES comprennent ces types d'approximations pour des interventions dans les secteurs de l'agriculture et de la foresterie. Il faudrait cependant que le Canada présente aussi ces estimations pour les prairies et les milieux humides (comme l'a fait l'Australie, par exemple), à l'aide de protocoles reconnus par la CCNUCC. Par ailleurs, même si l'obtention de crédits pour des solutions naturelles était possible selon l'inventaire des émissions du Canada, des questions complexes demeurerait quant au degré et à la durée de la séquestration offerte par ces solutions (voir l'encadré 10).

³⁵ Il existe également des formes de séquestration océanique. Nous les avons toutefois exclues de notre analyse parce qu'il existe peu de données quantitatives probantes sur leur potentiel au Canada et que ces interventions ne sont pas encore reconnues dans le système de comptabilisation des émissions de la CCNUCC (contrairement à la séquestration terrestre, que les pays peuvent inclure dans leurs inventaires de GES).

ENCADRÉ 10



Difficulté d'assurer la permanence et la mesure précise des émissions négatives résultant de solutions naturelles

Il est complexe de garantir que la séquestration du carbone à l'aide de solutions naturelles est réelle et plausible. Même s'il existe des méthodologies mondialement reconnues pour inclure la séquestration terrestre du carbone dans les inventaires d'émissions, il y a suffisamment de doutes quant à l'exactitude des estimations et de l'attribution pour que l'on se demande dans quelle mesure les pays devraient s'appuyer sur ce type de séquestration dans le but d'atteindre leurs cibles. Cette hésitation vient notamment du fait que s'il est possible de mesurer la séquestration du carbone à l'aide de technologies de CUSC, la séquestration à l'aide de solutions naturelles ne peut souvent être qu'estimée.

La pérennité est aussi un enjeu. Des estimations fiables de la séquestration doivent montrer que le carbone est stocké de façon permanente (soit pour au moins 100 ans) et que toute fuite est prise en compte (Thamo et Pannell, 2016). Les fuites pourraient survenir davantage avec les solutions naturelles qu'avec les solutions techniques qui séquestrent le carbone sous terre, une méthode qui s'est révélée supérieure pour le stockage à long terme (Kampman et coll., 2016). Par exemple, le carbone séquestré dans la biomasse peut être libéré lorsque la biomasse meurt en raison d'une sécheresse ou de feux incontrôlés (des événements qui devraient se multiplier en raison des changements climatiques). Le carbone séquestré peut également être perturbé par une conversion ultérieure des terres, pour le développement urbain, par exemple. Il peut être particulièrement difficile d'estimer la durée de séquestration du carbone dans le sol en raison de la variabilité du contenu de carbone dans le sol, de la nécessité de mesurer précisément cette variation et du coût élevé des procédures de mesure du carbone dans le sol (Garcia-Oliva et Masera, 2004). Enfin, bien que les fuites de carbone séquestré sous terre soient traitées dans les méthodologies de la CCNUCC, ces fuites doivent être observées et leurs effets estimés avec précision, pour qu'elles se reflètent de façon exacte dans l'inventaire des émissions d'un pays.

En second lieu, il faudrait mettre en place des mécanismes pour l'achat privé de crédits de compensation carbone par des solutions naturelles³⁶. S'il existe déjà des protocoles de compensation à la base de ce type de mécanismes, leur ampleur et leur portée devraient être augmentées considérablement pour permettre le déploiement à grande échelle de solutions naturelles.

En troisième lieu, l'empreinte physique des solutions naturelles suscite certaines questions difficiles : l'étendue des terres requises pour certaines solutions naturelles, comme le boisement, entrerait probablement en conflit avec d'autres utilisations du sol (la production alimentaire, par exemple) et aurait des conséquences sur les écosystèmes environnants (Fuhrman et coll., 2020).

Et le plus important : les solutions naturelles, comme elles seraient souvent déployées sur les terres traditionnelles des peuples autochtones, devraient respecter leurs droits inhérents, constitutionnels et issus de traités. La reconnaissance et le respect des droits autochtones sont au cœur de la relation du Canada avec les Premières Nations, les Inuits et les Métis visant à faire avancer la réconciliation et la reconnaissance de l'autodétermination. Mais dans leur forme actuelle, les solutions naturelles ont tendance à entrer en conflit avec les visions autochtones du monde, puisque l'idée de compensation représente une marchandisation de la nature et que les terres sont considérées comme vierges et propices au développement; dans les faits, ces solutions nient donc la présence des peuples autochtones (Indigenous Caucus Statement, 2020; Carton et coll., 2020).

Une autre approche des solutions naturelles, qui s'appuierait sur les perspectives et les valeurs autochtones, pourrait faire avancer les choses. Il faut absolument tenir compte des expériences passées. Les plans visant à augmenter la séquestration dans les terres jugées

sous-utilisées, et donc propices aux puits de carbone, ont souvent ignoré les pratiques complexes d'utilisation des terres des communautés locales et autochtones (Carton et coll., 2020). En comparaison, les initiatives de gestion des terres par les Autochtones, comme les aires protégées et de conservation autochtones, permettent non seulement la séquestration des GES par le maintien d'une gamme de services écosystémiques, mais aussi la conservation de la biodiversité, et les peuples autochtones y arrivent grâce à leur savoir et leurs systèmes de gouvernance et de valeurs (Townsend et coll., 2020). Grâce à une étroite collaboration avec des partenaires autochtones, des projets de solutions naturelles pourraient être mis en œuvre de façon à renforcer la relation nation à nation entre le Canada et les peuples autochtones et à améliorer la transition vers la carboneutralité, en s'appuyant sur le savoir de personnes qui habitent et chérissent les terres depuis des milliers d'années.

Le rôle des technologies d'émissions négatives est incertain

Dans notre analyse, les solutions techniques à émissions négatives, comme le captage direct dans l'air combiné au CUSC, varient grandement quant à la quantité d'émissions négatives qu'elles pourraient générer : les estimations les plus élevées prévoient 426 Mt par année d'ici 2050 (ce qui représente plus de la moitié des émissions actuelles du Canada) et les plus faibles, zéro.

Si ces solutions se révélaient rentables et utilisables à grande échelle, elles pourraient être très avantageuses pour le Canada. Non seulement elles permettraient de continuer à utiliser des combustibles fossiles, mais elles pourraient possiblement permettre d'en faire une utilisation accrue (56 à 62 % de la demande énergétique du Canada d'ici 2050)³⁷. Dans un tel scénario, notre modèle indique que l'utilisation

³⁶ Les gouvernements pourraient aussi acheter les crédits de compensation carbone et les allouer à des sources importantes d'émissions excédentaires. Pour ce faire, il faudrait qu'ils déterminent les types d'émissions qui recevraient ce type d'allocation.

³⁷ Une part de ces combustibles fossiles servirait à alimenter ces solutions techniques à émissions négatives. (Notre modèle tient compte de la demande énergétique de ces solutions et systèmes.)



énergétique au Canada suivrait une trajectoire bien différente (voir la figure 17) : on verrait une augmentation de l'utilisation globale d'ici 2050 plutôt qu'une diminution au fil du temps, comme c'est le cas le long de trajectoires économiques où ces technologies ne se révèlent pas viables. Si elles étaient assez rentables, les technologies à émissions négatives pourraient aider à éviter l'élimination complète des émissions dans certains secteurs (cette pratique pouvant être très coûteuse), ainsi qu'à limiter les changements structuraux dans l'économie prévus par notre modèle pour la plupart des autres trajectoires économiques.

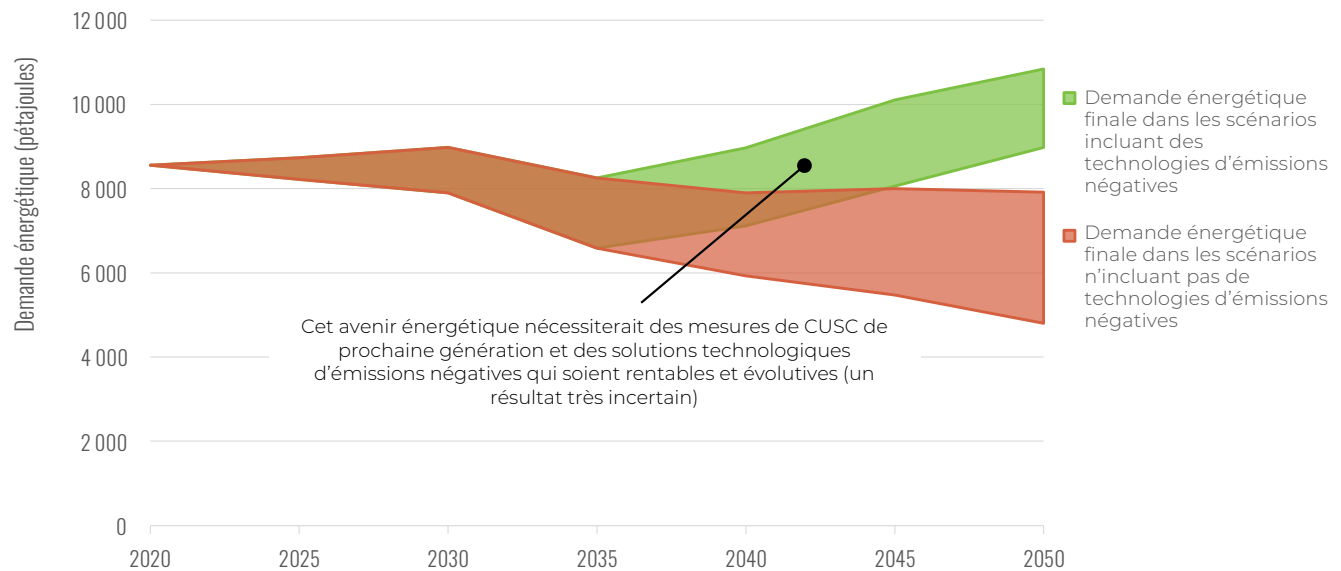
Si elles se révèlent rentables et utilisables à grande échelle, les solutions à émissions négatives pourraient aussi présenter d'importants avantages économiques pour l'Ouest canadien. Pourquoi? La région a le potentiel de produire de l'électricité propre à un coût

relativement faible, et le nord-est de la Colombie-Britannique ainsi que la majorité du territoire occupé par l'Alberta et la Saskatchewan ont un énorme potentiel géologique pour la séquestration de carbone³⁸. En développant l'industrie des émissions négatives, on utiliserait beaucoup des compétences actuelles de la main-d'œuvre dans l'Ouest canadien, de même que l'infrastructure existante. Fait intéressant, pour les scénarios analysés dans lesquels les technologies à émissions négatives se révèlent viables, le rendement du capital investi est assez élevé pour justifier la transformation de grandes parties du réseau de pipelines de l'Ouest canadien pour le transport du CO₂ à séquestrer, au lieu de combustibles fossiles. Il pourrait même être possible d'utiliser le carbone capté comme matière première de certains produits et comme intrant pour d'autres secteurs³⁹.

³⁸ Le basalte marin au large de la Colombie-Britannique pourrait également servir à la séquestration.

³⁹ CarbonCure, une entreprise de technologies propres de Nouvelle-Écosse, a conçu une solution qui permet d'injecter le CO₂ capté dans du béton, de façon permanente. Elle travaille déjà avec environ 300 producteurs de béton, qui injectent du CO₂ dans leurs produits (Milman, 2020). Comme cette solution ne dépend pas de la géologie, l'injection de CO₂ dans des matériaux pourrait se faire dans l'Ouest canadien ou ailleurs.

Figure 17 : Demande énergétique finale au Canada (pour tous les types d'énergie) selon diverses hypothèses quant à la rentabilité et à l'utilisation à grande échelle de solutions techniques à émissions négatives



Cependant, les technologies à émissions négatives auraient aussi leurs limites : même avec une adoption optimale, notre analyse prévoit qu'elles contribueraient à réduire uniquement une minorité des émissions totales qui doivent être éliminées d'ici 2050. On ne s'attend pas à ce que ces technologies puissent être utilisées avant au moins la prochaine décennie.

Pour profiter des avantages des technologies à émissions négatives, il faudrait qu'elles se révèlent rentables et utilisables à grande échelle, un scénario qui paraît très incertain aujourd'hui. Pour que ces solutions puissent être utilisées, il faudrait que la construction d'installations et le développement d'infrastructures prennent des proportions encore jamais vues. Il faudrait élaborer des protocoles rigoureux et reconnus pour les solutions à émissions négatives en vertu du système de comptabilisation des émissions de la CCNUCC. En outre, tout comme pour les solutions naturelles, des mécanismes de crédits et d'échanges devraient être créés pour

favoriser l'adoption à grande échelle de ces technologies, et il faudrait appliquer des méthodes comptables, de financement et institutionnelles claires. Par ailleurs, la population générale, qui se montre souvent sceptique devant ces solutions, pourrait être difficile à convaincre, et les peuples autochtones pourraient être réticents à donner leur appui. (Nous explorons davantage les obstacles et les conditions associés à l'adoption à grande échelle des solutions techniques à émissions négatives à la section 5.)

Étant donné toutes les conditions requises pour la mise en œuvre des solutions techniques à émissions négatives, cette trajectoire vers la carboneutralité au Canada est beaucoup moins probable que d'autres examinées dans le présent rapport.

Heureusement, nous avons établi que le Canada pouvait atteindre la carboneutralité d'ici 2050 sans recourir à ce type de technologies. Si ces solutions n'étaient pas disponibles, notre modèle montre que

d'autres solutions occuperaient une place plus importante (voir la figure 1 à la section 3.1). Nous avons également constaté que dans toutes les trajectoires vers la carboneutralité examinées, les émissions dans les secteurs du bâtiment et du transport des personnes seraient réduites à la source, sans recours aux solutions à émissions négatives.

À bien des égards, le plus grand risque associé aux solutions à émissions négatives est que l'on accorde

trop d'attention à leur utilité potentielle, et que les gouvernements et les entreprises ne posent pas les actions et ne fassent pas les investissements critiques à court terme. Certains ont déjà appelé à la séparation des cibles d'émissions négatives et d'émissions « brutes » (McLaren et coll., 2019). Nous explorons cette question dans notre exposé sur les valeurs sûres et les paris risqués à la section 5.



Des projets comme le projet pilote de capture atmosphérique directe de Carbon Engineering à Squamish, en Colombie-Britannique (Skwxwú7mesh-ulh Temíxw), pourraient grandement contribuer à la transition du Canada vers la carboneutralité. Mais il ne s'agit encore que d'une hypothèse.



FAÇONNER LES TRAJECTOIRES VERS LA CARBONEUTRALITÉ POUR LE CANADA

Cette section passe en revue bon nombre des solutions présentées à la section 4 et les répartit en deux catégories : les valeurs sûres et les paris risqués. Nous discuterons d'abord des rôles de chaque catégorie dans l'atteinte des objectifs de carboneutralité du Canada pour 2050 et de la cible intermédiaire pour 2030. Ensuite, nous nous pencherons sur les différentes façons dont les paris risqués pourraient se combiner pour créer un ou des systèmes carboneutres, ainsi que sur les inconvénients et les obstacles propres à chacun.

5.1 RÔLE DES VALEURS SÛRES ET DES « PARIS RISQUÉS » DANS LES TRAJECTOIRES DU CANADA VERS LA CARBONEUTRALITÉ

Comme le montre l'analyse, les technologies et les solutions qui pourraient permettre au Canada d'atteindre la carboneutralité dans les secteurs de l'énergie, de l'immobilier, du transport et de l'industrie ne sont pas toutes au même stade de développement.

Certaines des solutions discutées plus haut peuvent être considérées comme des valeurs sûres, c'est-à-dire des trajectoires à faible risque. Entrent dans cette catégorie

les solutions qui sont présentes dans tous les scénarios à l'étude, qui reposent sur des technologies commerciales déjà utilisées dans certains endroits ou domaines, qui peuvent être appliquées à grande échelle sans problème majeur ou dont les coûts devraient continuer de baisser (p. ex., mesures et équipement améliorant l'efficacité énergétique, électricité propre, thermopompes, véhicules électriques, CUSC des flux gazeux concentrés).

Le fait qu'une solution soit considérée comme une valeur sûre ne garantit pas que son application à grande échelle soit simple ou inévitable; toutes les solutions comportent leur lot d'obstacles et de défis. Pour assurer leur adoption, il faudra mettre en place des politiques strictes et coordonnées visant la réduction des coûts par la diffusion des connaissances, l'apprentissage par l'expérience et les économies d'échelle. Il sera aussi nécessaire de démanteler les barrières réglementaires et politiques qui ralentissent leur déploiement, tout en continuant d'élaborer des politiques ciblées sur l'équité et l'accessibilité. Néanmoins, notre analyse indique que ces valeurs sûres constituent un ensemble de solutions qui, moyennant certaines ressources et mesures incitatives, risquent de jouer un rôle de plus en plus important dans l'atteinte de la carboneutralité du Canada, peu importe la trajectoire empruntée.



Pour leur part, les paris risqués sont des solutions qui pourraient contribuer substantiellement à éliminer les émissions, mais dont l'avenir est encore incertain. Cette catégorie regroupe les solutions qui reposent sur des technologies dont le développement n'est encore qu'à ses débuts, qui risquent d'être difficiles à mettre en pratique à grande échelle ou qui ne s'appliquent qu'à certaines des trajectoires potentielles vers la carboneutralité (p. ex., hydrogène, CUSC des flux gazeux non concentrés, biocarburants fabriqués à partir de matières premières de deuxième génération, solutions à émissions négatives).

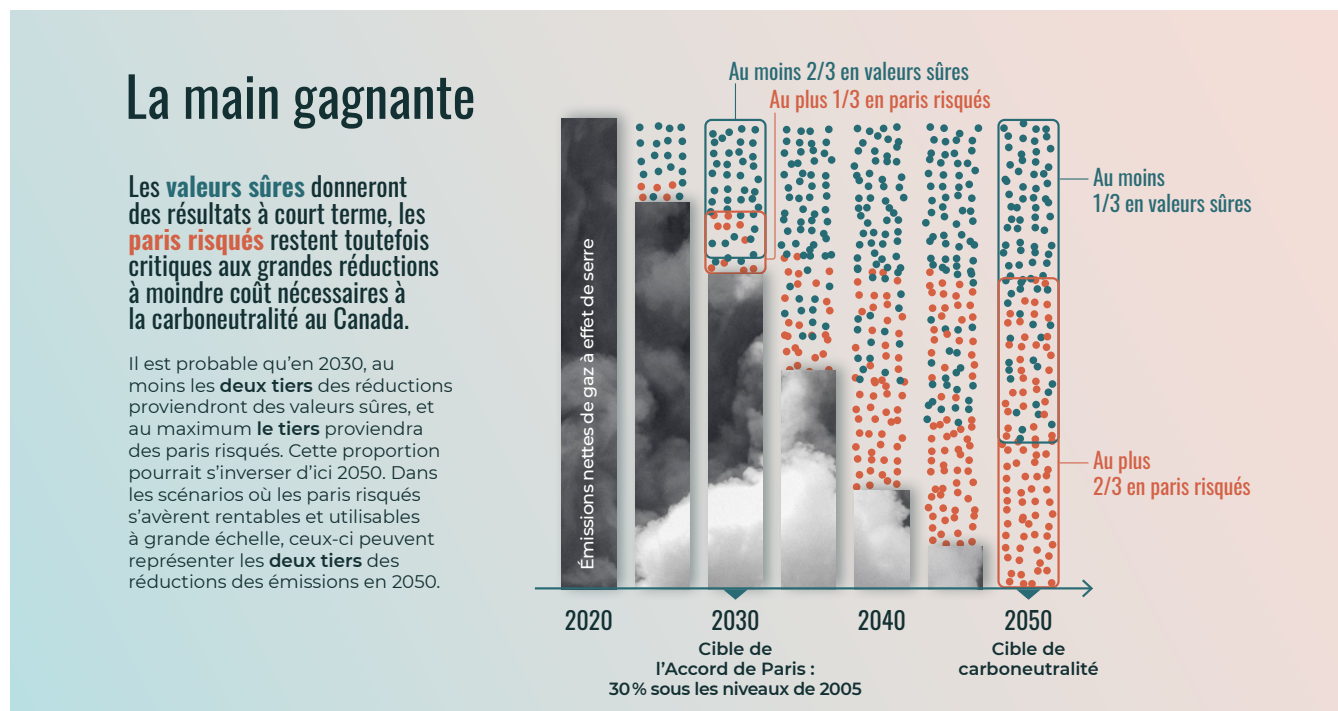
Cependant, pour être rentables, les paris risqués ont besoin de conditions et de résultats bien précis, que nous ne pouvons pour l'instant pas prédire avec certitude. Par exemple, le coût de la production d'hydrogène propre devra décroître fortement pour que cette option puisse supplanter les autres. Il faudra aussi établir la viabilité technique et l'applicabilité à grande échelle de la fabrication de gaz naturel renouvelable (GNR) à partir de matières premières de deuxième génération avant de l'envisager. Enfin, pour les solutions à émissions négatives, nous devons résoudre les questions de l'utilisation des terres, des inconvénients et des implications, ainsi que des conflits potentiels avec les droits et les valeurs autochtones.

Atteindre la cible de 2030 avec une majorité de valeurs sûres

Les valeurs sûres sont essentielles à l'atteinte de la carboneutralité du Canada et surtout de la cible d'émissions pour 2030. Dans tous les scénarios modélisés, elles s'imposent comme principales sources de réduction des GES d'ici 2030. Toutefois, leur contribution est plus variable à long terme, où les paris risqués gagnent en pertinence dans certains scénarios.

La figure 18 illustre ce basculement, montrant que les valeurs sûres sont responsables d'au moins les deux tiers des réductions menant à la cible de 2030 dans tous les scénarios, mais seulement d'environ le tiers de celles menant à la cible de 2050. À noter cependant que la figure reflète leur contribution minimale. Dans les scénarios où de multiples paris risqués semblent non rentables ou inapplicables à grande échelle, les valeurs sûres occupent une place prépondérante, étant potentiellement à la source de 89 % des réductions pour 2030 et de 66 % de celles pour 2050.

Figure 18 : Contribution des valeurs sûres à la réduction des émissions, toutes trajectoires confondues



Les valeurs sûres sont systématiquement plus importantes que les paris risqués pour ce qui est d'atteindre la cible de 2030, même lorsque ces derniers sont viables. En effet, même dans les scénarios idéaux, le temps et les lourds investissements requis pour faire progresser le développement des solutions émergentes font en sorte que les valeurs sûres demeurent généralement plus rentables à court terme. De fait, ces dernières offrent des trajectoires « sans regret » vers la cible de 2030, dont la pertinence ne dépend pas des paris risqués (ni d'aucun autre facteur).

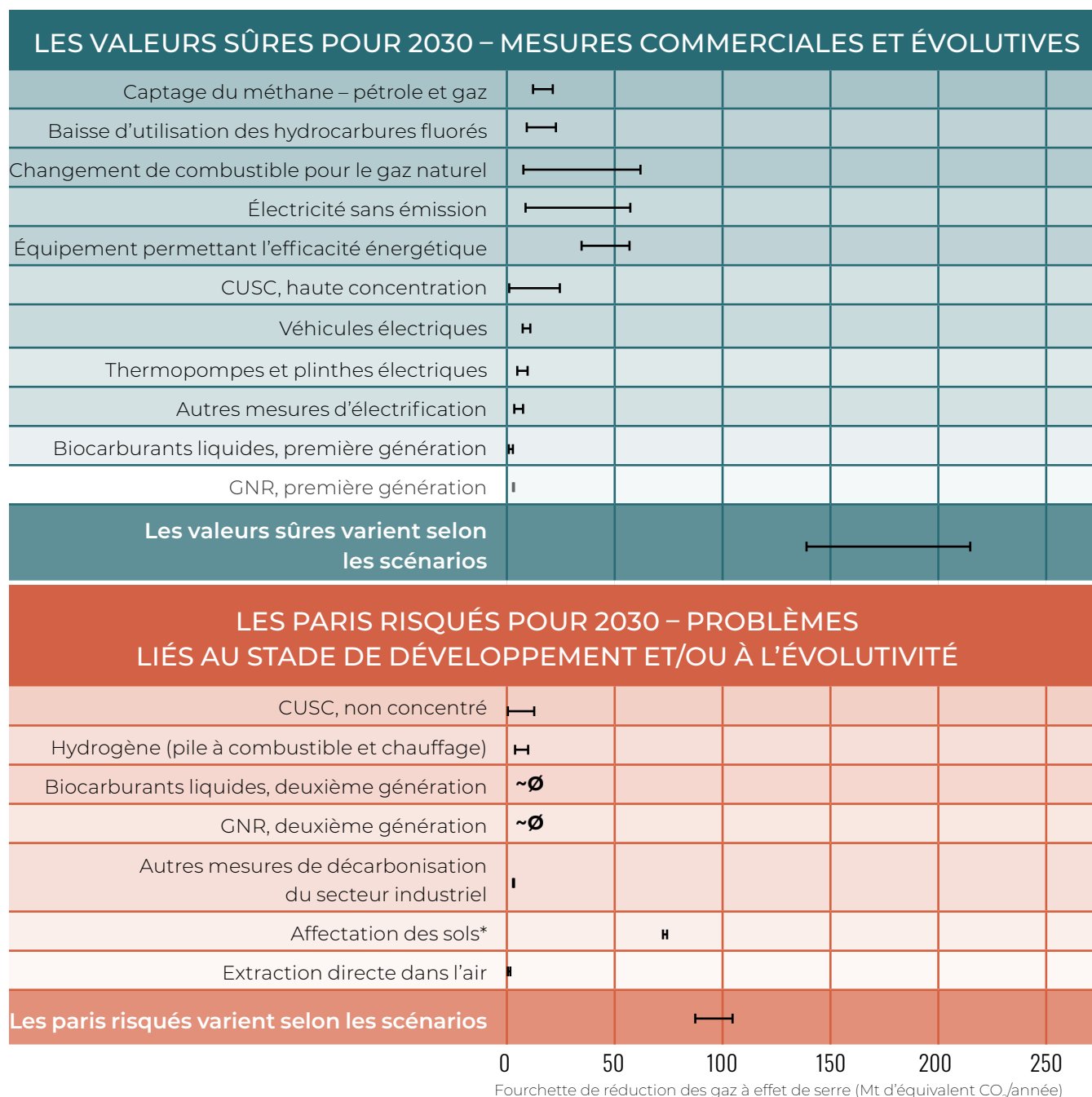
Mais quelles sont exactement les valeurs sûres à employer pour atteindre la cible de 2030? Quelles sont l'importance et la variabilité de leurs contributions respectives? La figure 19 fournit une vue d'ensemble des principales valeurs sûres et des réductions d'émissions qu'elles pourraient permettre d'ici 2030, tous scénarios confondus. Elle présente aussi la part plus modeste que pour-

raient occuper divers paris risqués majeurs sur cette même période. Parmi ces derniers, ce sont les solutions naturelles à émissions négatives qui semblent les plus prometteuses. Cependant, si le modèle laisse supposer pour celles-ci une contribution importante et une variabilité faible, c'est en grande partie parce qu'il est actuellement difficile d'établir une estimation crédible de leur potentiel.



De fait, ces dernières offrent des trajectoires « sans regret » vers la cible de 2030, dont la pertinence ne dépend pas des paris risqués (ni d'aucun autre facteur).

Figure 19 : Réduction des émissions projetées d'ici 2030 pour diverses solutions, toutes trajectoires confondues



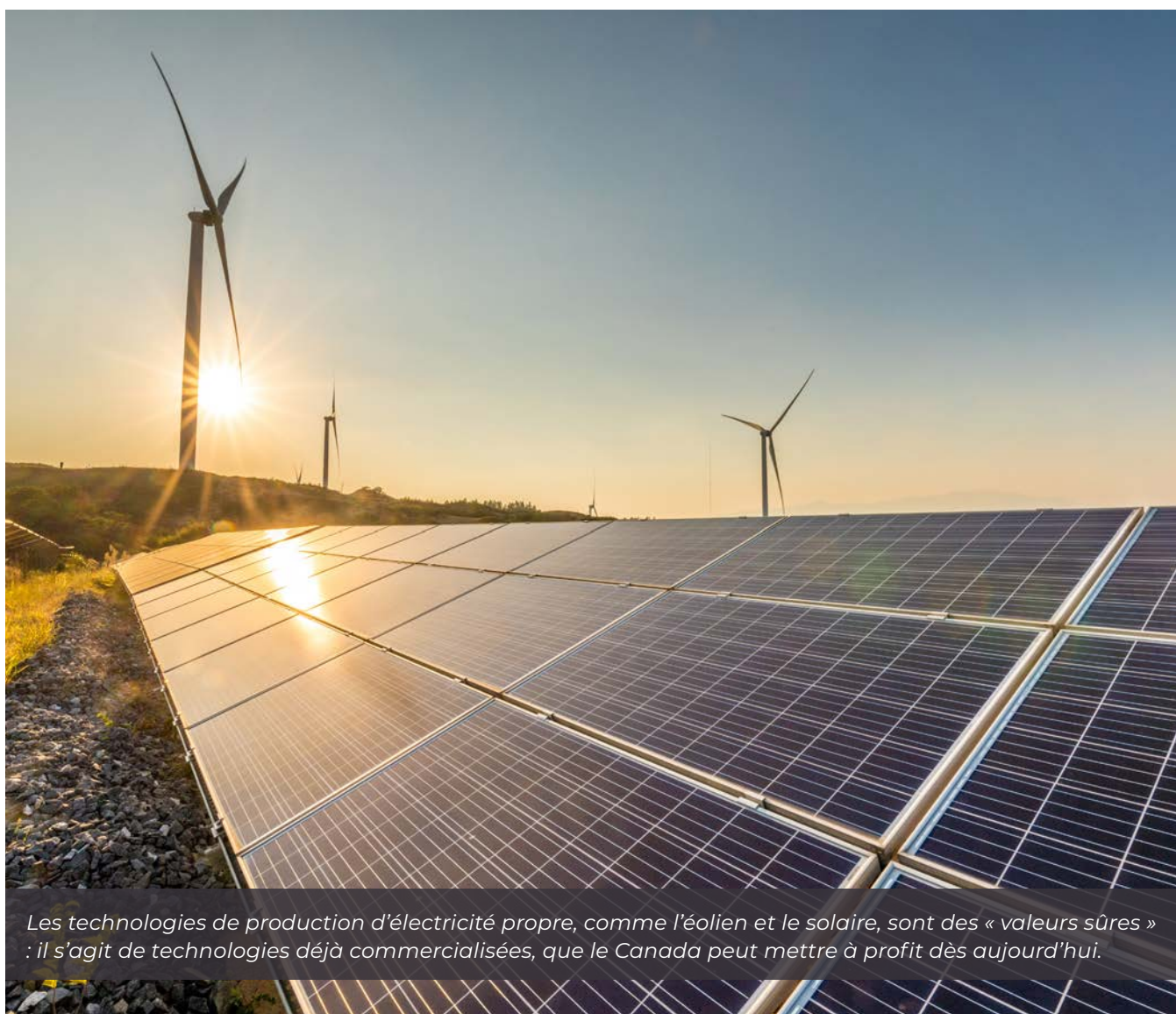
La catégorisation des solutions en valeurs sûres ou en paris risqués se fonde sur une analyse de modélisation, une revue de la littérature et les commentaires d'experts ainsi que sur un processus permettant d'isoler les trajectoires possibles vers la carboneutralité (voir l'encadré 2).

* Les solutions naturelles sont considérées comme des paris risqués en raison des difficultés à surmonter pour assurer leur additionnalité et leur permanence, de l'incertitude entourant leur application à grande échelle, des priorités conflictuelles dans l'utilisation des terres et des conflits potentiels avec les droits et les valeurs autochtones. Si la fourchette d'atténuation potentielle des GES est étroite pour ces solutions, c'est principalement parce que les estimations crédibles à ce sujet se font rares, et non parce que les résultats étaient stables et uniformes dans les différents scénarios. Il est possible que les données présentées soient trop faibles ou trop élevées.

5. FAÇONNER LES TRAJECTOIRES VERS LA CARBONEUTRALITÉ POUR LE CANADA

Il faudrait étudier davantage la contribution de l'électricité propre et des combustibles naturels. Le remplacement du charbon par le gaz naturel dans la production d'électricité permettrait de réduire les émissions d'environ deux tiers par unité d'électricité (les règlements fédéraux et provinciaux prévoient l'élimination des centrales au charbon d'ici 2030). Toutefois, le gaz naturel ne constituant pas une source d'électricité carboneutre, il ne peut constituer qu'une solution temporaire. Tôt ou tard, il devra être remplacé à son tour (au risque de générer des actifs délaissés) ou bonifié de mécanismes de CUSC. Compte tenu de

ces difficultés à long terme, il pourrait dans certains cas être plus rentable de sauter cette étape et d'opter directement pour des modes de production carboneutres déjà sur le marché tels que l'hydroélectricité, l'éolien et le solaire photovoltaïque, qui peuvent être considérés comme des valeurs sûres. Les autres sources d'énergie propre sont classifiées comme des paris risqués et constituent donc un pari plus hasardeux pour 2030. Il existe tout de même suffisamment de technologies fiables actuelles ou potentielles pour que la production carboneutre d'électricité demeure dans son ensemble une valeur sûre (voir l'encadré 11).



Les technologies de production d'électricité propre, comme l'éolien et le solaire, sont des « valeurs sûres » : il s'agit de technologies déjà commercialisées, que le Canada peut mettre à profit dès aujourd'hui.

ENCADRÉ 11



L'électricité propre comme valeur sûre

Il est apparu, dans notre analyse, que la production d'électricité propre était l'une des valeurs les plus sûres. Certaines options sont considérées comme des paris risqués parce qu'elles requièrent des technologies qui n'ont pas encore été commercialisées ou risquent d'être difficiles à appliquer à grande échelle, mais il existe tellement de sources actuelles et potentielles d'électricité propre que, dans l'ensemble, ce type de production est une valeur sûre. Si une technologie donnée ne répond pas aux attentes, nous pourrions simplement en choisir une autre.

Les sources d'électricité propre se divisent en deux grandes catégories : intermittentes et stables. Les sources intermittentes, comme le solaire photovoltaïque et l'éolien, ont un volume de production qui varie avec les conditions météorologiques. Les sources stables, comme les réservoirs hydroélectriques, ont une production entièrement contrôlable.

Bon nombre des principales technologies d'énergie propre dépendent de sources intermittentes, notamment les éoliennes côtières et maritimes et les parcs solaires photovoltaïques commerciaux, dont les prix ont grandement baissé au cours des 10 dernières années – surtout pour le photovoltaïque. Bien qu'il subsiste des inconvénients à ces technologies (particulièrement lorsqu'elles sont responsables d'une grande portion de l'approvisionnement total en électricité, comme expliqué plus bas), leur déploiement a suffisamment évolué et leur coût, suffisamment baissé pour qu'elles puissent être considérées comme des valeurs sûres. Sans compter qu'elles jouent déjà un rôle considérable et grandissant dans la production d'énergie au Canada : par exemple, la société albertaine Greengate Power Corporation prévoit de commencer à exploiter la plus grande centrale solaire du pays – dont la capacité s'élève à 400 MW – l'année prochaine (Hall, 2019).

Cependant, plus les sources intermittentes représentent une grande proportion de l'apport en électricité d'un réseau (à compter de 60 % du total), plus il est difficile de composer avec leur variabilité. Il existe plusieurs façons de régler ce problème, par exemple en employant des solutions de stockage permettant de conserver les surplus pour les périodes de pointe; la société TransAlta a d'ailleurs récemment installé en Alberta le plus gros système de stockage par batterie au pays (Crider, 2020). Des initiatives de gestion de la demande pourraient aussi être employées pour inciter les consommateurs à ajuster leur utilisation en fonction de l'offre. Le transport des surplus entre les différentes régions géographiques peut également aider à pallier la variabilité. Mais malgré toutes ces solutions, la plupart des réseaux électriques auront probablement besoin de sources stables d'énergie propre pour assurer une alimentation constante.

Heureusement, de telles sources existent déjà, sous de nombreuses formes. Pour être exploitées, certaines requièrent des technologies couramment utilisées (p. ex., hydroélectricité, énergie nucléaire); d'autres, des technologies accessibles, mais peu abordables (p. ex., énergie géothermique); et encore d'autres, des technologies qui n'en sont qu'aux premières étapes de leur développement ou de leur commercialisation (p. ex., centrales au charbon ou au gaz naturel dotées de mécanismes de CUSC, petits réacteurs nucléaires modulaires, transformation d'hydrogène bleu ou vert en électricité au moyen d'une turbine ou d'une pile à combustible) (Sepulveda et coll., 2018; Jenkins et coll., 2018; Dowling et coll., 2020).

Toutefois, le déploiement à grande échelle est complexe pour toutes les sources stables. L'hydroélectricité et le nucléaire ont fait leurs preuves, mais les nouveaux projets se heurtent souvent à l'opposition des collectivités locales et comportent des risques pour les écosystèmes et la biodiversité; les technologies émergentes comme les systèmes géothermiques et les petits réacteurs modulaires se heurtent encore à d'importantes barrières techniques et économiques; et les mécanismes de CUSC sont encore beaucoup trop dispendieux (AIE, 2019b).

Dans notre analyse, nous avons fait varier d'un scénario à l'autre l'évolution des coûts associés aux sources stables d'électricité propre, de sorte à refléter l'incertitude qui les entoure. Pour ce qui est d'estimer le rôle précis de chaque technologie, nous avons été limités dans nos projections de l'avenir du secteur, car le modèle gTech ne permet pas de simuler la tarification au compteur horaire, qui peut pourtant avoir d'importantes répercussions sur les aspects économiques des différentes sources d'énergie. Ainsi, nous ne sommes pas en mesure de fournir une projection détaillée des meilleures options. C'est pourquoi nous nous concentrons davantage sur le rôle général que pourrait être appelée à jouer l'électricité propre.

À ce sujet, notons que les multiples défis et incertitudes faisant obstacle aux technologies mentionnées plus haut ne constituent pas une barrière au déploiement global de l'énergie propre. Afin de compenser les risques propres à chaque technologie et de permettre aux tendances du marché de faire ressortir les options les plus rentables, les autorités doivent

adopter des politiques qui assurent le même traitement à toutes les sources d'électricité propre – intermittentes et stables – dans la composition des portefeuilles énergétiques (composition établie en fonction des besoins). Le choix des sources ne doit cependant pas reposer simplement sur l'économie et les caractéristiques physiques d'une région (p. ex., le potentiel éolien d'un site donné), mais aussi sur le réseau énergétique existant, les systèmes de gouvernance en place et les préférences politiques et culturelles de la population locale. Citons notamment l'Allemagne, qui a choisi d'ignorer le CUSC et le nucléaire au profit de l'acquisition à grande échelle de technologies solaires photovoltaïques, par l'intermédiaire du programme Energiewende.

L'importance des « paris risqués » pour éliminer complètement les émissions du Canada d'ici 2050

Les solutions paris risqués pourraient s'avérer essentielles à l'atteinte de la cible de zéro émission nette au Canada, mais leur rôle exact demeure hautement incertain. D'après notre modèle, la proportion de ces solutions à employer d'ici 2050 varie énormément d'un scénario à l'autre, selon les technologies émergentes qui deviennent viables, leurs coûts relatifs et leur capacité à être déployées à grande échelle. La figure 20 présente les fourchettes de contribution potentielles aux objectifs de 2050, tous scénarios confondus. On remarque notamment que de nombreuses solutions paris risqués pourraient tout autant occuper une part majeure qu'être complètement inutiles dans la réduction des GES.

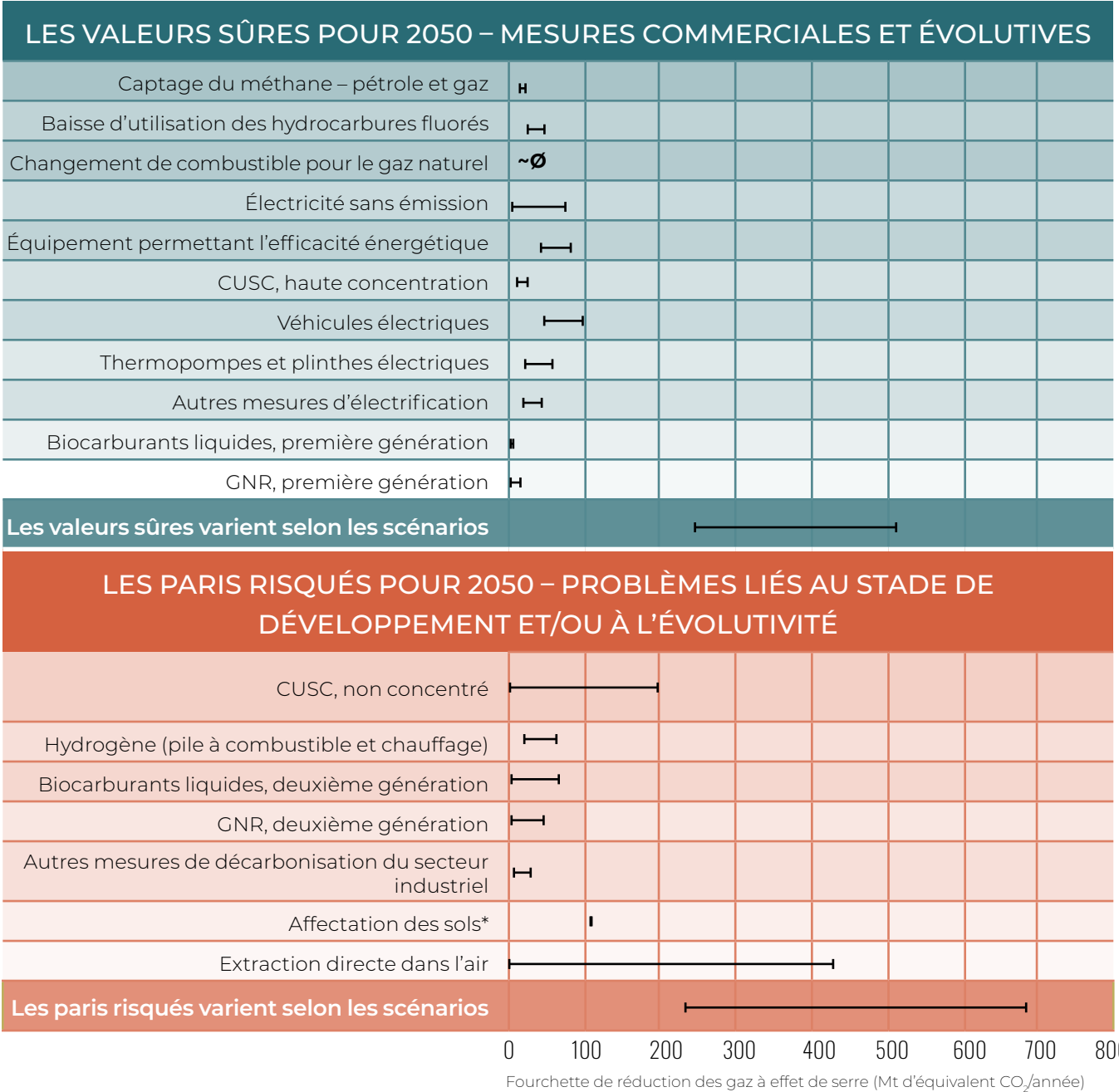
La captation atmosphérique directe est l'un des paris risqués les plus intéressants. Il s'agit d'une solution technique à émissions négatives dont le potentiel de

neutralisation est immense, pouvant s'élever à plus de la moitié de l'inventaire des GES actuel du pays. De bien des façons, il s'agit du coup de dés ultime. Cette solution pourrait être capitale pour l'atteinte de la carboneutralité par le Canada, mais plusieurs incertitudes subsistantes mettent en doute sa fiabilité.

Pour tirer profit de n'importe lequel des paris risqués proposés ici, il faudra consentir des efforts soutenus et coordonnés sur de nombreux plans. Même les solutions qui reviennent dans tous les scénarios (p. ex., piles à hydrogène) devront être sérieusement travaillées avant de pouvoir apporter une réelle contribution, et celles qui sont déjà viables sur les plans technique et économique présentent des obstacles majeurs à un déploiement à grande échelle (voir la section 5.2).

Par ailleurs, les avancées technologiques ne suffiront pas à propulser le Canada vers la carboneutralité. L'encadré 12 se penche sur l'importance des changements culturels et comportementaux dans la transition énergétique.

Figure 20 : Réductions des émissions projetées d'ici 2050 pour diverses solutions, toutes trajectoires confondues



La catégorisation des solutions en valeurs sûres ou en paris risqués se fonde sur une analyse de modélisation, une revue de la littérature et les commentaires d'experts ainsi que sur un processus permettant d'isoler les trajectoires possibles vers la carboneutralité (voir l'encadré 2).

* Les solutions naturelles sont considérées comme des paris risqués en raison des difficultés à surmonter pour assurer leur additionalité et leur permanence, de l'incertitude entourant leur application à grande échelle, des priorités conflictuelles dans l'utilisation des terres et des conflits potentiels avec les droits et les valeurs autochtones. Si la fourchette d'atténuation potentielle des GES est étroite pour ces solutions, c'est principalement parce que les estimations crédibles à ce sujet se font rares, et non parce que les résultats étaient stables et uniformes dans les différents scénarios. Il est possible que les données présentées soient trop faibles ou trop élevées.

ENCADRÉ 12



Rôle des changements culturels et comportementaux dans la réduction des émissions

Les comportements des Canadiens – habitudes alimentaires, modes de transport, utilisation de l'énergie, profil de consommation – joueront un rôle crucial dans l'atteinte de la carboneutralité. Leur transformation pourrait venir des citoyens eux-mêmes, être stimulée par des politiques incitatives ou résulter d'une évolution des normes culturelles, ou encore découler d'une combinaison de ces éléments.

L'adoption d'un régime alimentaire plus durable est une bonne façon de réduire ses émissions. Par exemple, si les Canadiens diminuaient considérablement leur consommation de viande et de produits laitiers, les émissions de GES totales du pays pourraient baisser de 1 % à 3 % d'ici 2030 (Frenette et Vaillancourt, 2017). L'élimination des produits animaliers n'est toutefois pas la seule façon d'arriver à une alimentation plus durable, et cette option ne convient peut-être pas à la culture canadienne. D'autres études indiquent que la réduction des aliments transformés est un autre facteur déterminant de la durabilité (Fardet et Rock, 2020; Hyland et coll., 2017). Néanmoins, bien qu'il existe plusieurs outils stratégiques pour encourager les consommateurs à adopter un régime alimentaire durable – taxes, étiquetage des produits, réduction des déchets –, changer les habitudes d'une population demeure un défi de taille (Hyland et coll., 2017).

La modification des habitudes de transport – marche, vélo, transport en commun, covoiturage, autopartage, diminution du nombre de voitures, écoconduite – permet aussi de réduire les émissions. Les données montrent qu'une conduite plus écologique pourrait faire diminuer la consommation automobile de carburant de 25 % (RNCAN, 2020f). La limitation des déplacements aériens

pourrait également entraîner d'importantes réductions, surtout s'il s'agit d'un mouvement mondial. Par exemple, si 140 millions de voyages d'affaires étaient remplacés par des conférences en ligne, nous pourrions mondialement éliminer jusqu'à 17 Gt d'éq. CO₂ d'ici 2050, soit 1,5 à 22 fois l'inventaire actuel des GES du Canada (Hawken, 2017).

Cependant, la modification des habitudes comporte son lot de défis. Notamment, la perception négative du public quant au transport en commun risque d'entraver les efforts visant l'abandon de la voiture (Thomas et coll., 2014; St-Louis et coll., 2014). Les changements pourraient aussi entraîner des conséquences imprévues et indésirables : la popularisation de l'autopartage (Namazu et coll., 2018) et des services de voiturage (Coulombel et coll., 2019; Axsen et Wolinetz, 2019) pourrait par exemple faire augmenter l'usage général de l'automobile chez des populations qui n'en possédaient pas. Notons aussi que le transport aérien est depuis longtemps jugé essentiel à beaucoup d'activités professionnelles, situation qui pourrait toutefois changer après la pandémie de COVID19.

La transformation des habitudes de consommation énergétique et matérielle des ménages – baisse de la demande de chauffage en hiver et de refroidissement en été, installation de dispositifs écoénergétiques, hausse du recyclage et du compost – peut aussi contribuer à l'atteinte de la carboneutralité. Certaines initiatives en ce sens pourraient cependant avoir des conséquences indésirables : les petits consommateurs d'énergie pourraient augmenter leur utilisation après s'être rendu compte de l'écart avec leurs pairs (Wynes et Nicholas, 2018), et la population pourrait acheter davantage, réconfortée par l'idée que les produits seront recyclés et non jetés (Catlin et Wang, 2013). L'idée fausse que les efforts de préservation de l'énergie sont futiles pourrait également miner la motivation des citoyens (RNCan, 2016).

Enfin, l'évolution **des habitudes d'achat** peut aussi contribuer à réduire les émissions, notamment l'achat de produits locaux et la consommation de services plutôt que de biens, sans compter la réduction volontaire de la consommation globale. Il faut néanmoins mentionner certains bémols : les produits locaux ne sont pas forcément moins polluants; cela dépend de leur mode de production et des moyens de transport employés par les fournisseurs plus éloignés. Par ailleurs, toute tentative d'engager une réforme générale des habitudes est confrontée à une culture de consommation axée sur l'abordabilité et l'abondance des biens, dans laquelle la possession de certains objets est assimilée à un statut social.



L'influence d'un retardement des mesures sur le coût des valeurs sûres et des « paris risqués »

Plus nous attendons pour réduire les émissions, plus il sera coûteux d'atteindre nos objectifs (TRNEE, 2011; Furman et coll., 2015; Sanderson et O'Neill, 2020). En effet, le retardement de la mise en œuvre ne fait qu'augmenter les coûts de la transition vers la carboneutralité, tant pour les valeurs sûres que pour les solutions paris risqués. Cependant, les mécanismes ne sont pas les mêmes pour les deux catégories.

Pour les valeurs sûres, un report de la mise en œuvre et du déploiement fera grimper les coûts de la transition, car en l'absence de politiques suffisamment strictes pour accroître l'adoption de ces solutions à court terme, les ménages et les entreprises continueront d'acheter des voitures, des systèmes de chauffage et d'autres appareils hautement émetteurs à mesure que des remplacements s'imposeront. Cela risque de créer une situation où il faudra se débarrasser prématurément de ces acquisitions (qui deviendront alors de coûteux actifs délaissés) ou investir davantage pour réduire les émissions dans d'autres sphères de l'économie pour compenser.

Du côté des paris risqués, tout retard dans le développement d'une solution encore émergente ou trop dispendieuse (ou les deux) fera grimper les coûts. Pour que le Canada puisse profiter d'options rentables à moyen et à long terme, il lui faut investir dès maintenant dans l'avancée des technologies. Comme expliqué plus loin, cet investissement peut prendre la forme de recherche et développement, de démonstrations et de projets pilotes, de mesures incitatives, d'initiatives internationales de collaboration ou même d'un investissement public direct.

Mais quelles solutions paris risqués les décideurs et le secteur industriel devraient-ils prioriser? Elles ont toutes un fort potentiel, mais lesquelles sont autonomes et lesquelles sont complémentaires? Comment peuvent-elles (ou ne peuvent-elles pas) se combiner? Quels genres d'infrastructures requièrent-elles? Afin d'enraciner dans le concret le potentiel des paris risqués, nous couvrirons dans la prochaine section les façons dont les solutions existantes et potentielles pourraient être organisées en trois types de systèmes carboneutres différents. Nous présenterons les avantages et les désavantages de chacun et explorerons leur faisabilité et leurs attraits.

5.2 TROIS SYSTÈMES CARBONEUTRES POTENTIELS POUR LE CANADA

La myriade de trajectoires et de solutions introduites plus haut nous permet de dresser un portrait clair des diverses façons dont le Canada pourrait atteindre la carboneutralité. Mais que remarque-t-on en s'attardant aux caractéristiques et aux tendances communes quant à la consommation d'énergie une fois l'objectif atteint?

D'après notre analyse, l'efficacité énergétique sera l'un des principaux facteurs des réductions à venir d'ici 2030. En effet, même si des solutions de remplacement des combustibles seront mises en œuvre à certains endroits et pour certaines applications, le pays continuera d'employer un système principalement basé sur les combustibles fossiles. Toutefois, au-delà de 2030, le Canada devra entamer une transition vers un système à zéro émission nette, une seconde phase pour laquelle notre analyse a révélé plusieurs possibilités distinctes.

Notre analyse globale des scénarios isole trois systèmes carboneutres potentiels : un premier, basé sur une combinaison de combustibles fossiles et d'émissions négatives; un deuxième sur les biocarburants; et un troisième sur l'électrification et l'hydrogène⁴⁰. Chacun d'entre eux met à profit une combinaison différente de paris risqués et de valeurs sûres et présente des avantages et des inconvénients uniques, de même que des obstacles importants à un déploiement à grande échelle. (Il va sans dire que les efforts pour atteindre la carboneutralité ne se limitent pas au secteur énergétique; sa décarbonisation sera au cœur du travail de réduction, mais d'autres initiatives peuvent aussi contribuer à la diminution des émissions de méthane, notamment dans le domaine agricole, comme expliqué dans l'encadré 13.)

Plus loin, nous entrons dans le détail de ces trois systèmes potentiels afin d'explorer les avantages et les obstacles associés au choix de chacun comme trajectoire principale vers la carboneutralité.

Bien que nous nous appliquions ici à déterminer ce qu'impliquerait l'emploi exclusif de chaque système, le Canada pourrait tout à fait choisir de les combiner en appliquant l'un ou l'autre d'entre eux selon les secteurs, les régions ou des besoins énergétiques précis (Tsiropoulos et coll., 2020; Davis et coll., 2018; Bataille, 2020). En effet, les scénarios que nous avons modélisés regroupent souvent des éléments de multiples systèmes. Par exemple, le système basé sur l'électrification et l'hydrogène connaît une croissance appréciable même quand d'autres systèmes sont parallèlement adoptés à grande échelle. Par exemple, dans les scénarios où les solutions à émissions négatives sont communément appliquées, notre modèle projette tout de même une augmentation de 65 % à 92 % de l'utilisation de l'électricité par rapport à aujourd'hui.

Il demeure entièrement possible que l'un des systèmes s'avère dominant à long terme, en raison de ses avantages économiques et de choix politiques favorisant les économies d'échelle et le vaste potentiel d'intégration qu'offre un système unique. Toutefois, le choix définitif d'un système (ou de plusieurs) ne dépendra pas que des décideurs canadiens; il sera influencé par des facteurs que le Canada peut contrôler (choix politiques nationaux, soutien du public, etc.), mais aussi par des éléments qui lui échappent complètement (décisions d'investissement et situation politique internationales, entre autres).

⁴⁰ Le rapport se penche principalement sur la capacité de ces options à répondre à la demande en énergie finale. Comme mentionné dans la section 3.2, tant les sources d'énergie primaires, comme le gaz naturel, que les sources secondaires, comme l'électricité, l'hydrogène et l'essence, peuvent être transformées en énergie finale. Tous les systèmes présentés dans cette section visent la carboneutralité, c'est-à-dire à ce que les activités de consommation et de production du pays ne génèrent aucune émission nette. ⁴⁰

ENCADRÉ 13



Atténuation du méthane agricole

Puissant polluant atmosphérique, le méthane est l'un des gaz à effet de serre les plus répandus au Canada, se classant au deuxième rang avec environ 15 % des émissions nationales (gouvernement du Canada, 2019). Bien que le secteur pétrolier et gazier soit le plus gros producteur de méthane du pays, le secteur agricole n'est pas en reste et devra lui aussi jouer un rôle essentiel dans l'atteinte de la carboneutralité.

Les émissions de méthane agricole proviennent principalement de l'élevage du bétail, en plus des sols agricoles et des terres saturées. Il existe de nombreuses façons de les réduire, de la gestion des terres (gestion des sols, revégétalisation) et du bétail (nourrissage, régime alimentaire, pâturage, gestion du fumier) à la stimulation de la demande de sources de nourriture non émettrices.

Selon une étude, les inhibiteurs et les vaccins anti-méthane sont nos meilleurs outils pour réduire les émissions du secteur agricole. Seul bémol : ils n'ont pas encore été commercialisés (Reisinger et coll., 2018). Une deuxième étude récente révèle que les fermes laitières devront modifier le régime alimentaire du bétail et revoir leurs stratégies de gestion du fumier pour diminuer leurs émissions (Jayasundara et coll., 2016). Cependant, toutes ces solutions s'accompagnent d'obstacles importants au déploiement à grande échelle, dont des questions de développement technologique, de sécurité alimentaire, de coûts pour les agriculteurs et de concurrence dans le domaine agricole.



Combinaison de combustibles fossiles et d'émissions négatives

Dans le premier des trois systèmes carboneutres potentiels, les combustibles fossiles demeureraient la source d'énergie principale du Canada, et leurs émissions seraient neutralisées par de grandes quantités d'émissions négatives. D'après notre analyse, l'emploi de solutions naturelles à émissions négatives permettrait de continuer à exploiter les combustibles fossiles dans une certaine mesure, dans les industries où il serait très coûteux de les remplacer. Cependant, pour déployer ce système à grande échelle, il faudrait aussi employer des solutions techniques, qui devraient d'abord faire leurs preuves sur les plans de la rentabilité et de l'adaptabilité. Le système repose-rait probablement en grande partie sur la captation atmosphérique directe et le CUSC pour piéger les émissions dans le sol (option que bien d'autres pays

n'ont pas, en raison de leur géologie) ou dans diverses matières. Dans ce scénario, bon nombre des technologies à émissions négatives utilisées seraient elles-mêmes alimentées par des combustibles fossiles, dont les émissions seraient aussi neutralisées.

Le fait de compenser l'exploitation de combustibles fossiles par des émissions négatives entraînerait une augmentation des coûts d'utilisation des combustibles, si bien que d'autres solutions seraient plus rentables pour certaines applications. Par exemple, l'alimentation électrique demeurerait idéale pour les véhicules légers, et les bâtiments emploieraient une principalement combinaison d'efficacité énergétique, d'alimentation électrique et de gaz propres pour atteindre la carboneutralité, mais les combustibles fossiles prévaudraient toujours sur beaucoup d'autres plans, notamment dans les industries lourdes et pour les véhicules mi-lourds et lourds..

Voici ce qu'impliquerait un tel système pour l'économie et la population du Canada :

- La combinaison de combustibles fossiles et d'émissions négatives requerrait moins de changements structurels que les autres systèmes d'ici 2050, car elle permettrait une utilisation continue (ou même croissante) des combustibles dans diverses sphères de l'économie. De plus, les secteurs hautement émetteurs pour lesquels il serait coûteux de réduire ou de capter les émissions à la source pourraient conserver leurs processus de production actuels et s'en remettre aux émissions négatives des autres secteurs. Ce système demande également une moins grande rotation des stocks de capital, ce qui augmente la durée de vie des actifs productifs. À noter que la production de combustibles fossiles du Canada demeurerait tout de même essentiellement dépendante de la demande mondiale en pétrole et de la rigueur des politiques climatiques internationales.
- Un tel système énergétique pourrait aussi ouvrir des débouchés économiques pour l'Ouest du Canada, qui possède le savoir-faire et la géologie nécessaires à l'application de solutions techniques à émissions négatives. Une étude a notamment révélé que l'Alberta avait la capacité de piéger plus de 1 100 Mt de CO₂ sur une période de 30 à 40 ans (Alberta Carbon Capture and Storage Development Council, 2009). Le pays pourrait même exporter des émissions négatives à l'étranger, si l'article 6 de l'Accord de Paris venait à le permettre.
- S'il est vrai que nous verrions avec ce système diminuer la pollution de l'air et les problèmes de santé associés à la production et à la consommation d'énergie, cette amélioration serait largement attribuable aux avancées incessantes des technologies antipollution. Selon notre modèle, le fardeau annuel que représente cette pollution atmosphérique pour la santé s'allégerait de 75 % d'ici 2050. Soulignons toutefois que ces gains sont moins importants que ceux des autres systèmes, en raison de l'utilisation continue (voire croissante) des combustibles fossiles (Soltanzadeh et Hakami, 2020).
- Ce système occasionnerait moins de perturbations du travail que ceux qui cherchent à éliminer les combustibles fossiles. Cependant, la production de ces derniers demeurerait dépendante des forces du marché international, et les risques associés à la hausse de l'automatisation et aux autres tendances du secteur de la main-d'œuvre persisteraient; les travailleurs ne seraient pas forcément à l'abri des pertes d'emploi massives et des grands changements.
- Le système pourrait aussi être mal reçu par certaines communautés autochtones. En effet, l'utilisation répandue de solutions à émissions négatives entrerait probablement en conflit avec leurs valeurs. L'exploitation commerciale de la nature et la poursuite des extractions de combustibles fossiles reflètent une relation avec l'environnement qui ne correspond pas à leur vision du monde, notamment vis-à-vis des principes de réciprocité, d'équilibre et d'interdépendance. Les solutions naturelles à émissions négatives requièrent souvent de vastes étendues de terres, ce qui pourrait avoir des répercussions sur les droits des Autochtones, surtout s'ils ne sont pas impliqués et écoutés tout au long du processus. Qui plus est, les conséquences environnementales de l'extraction continue de combustibles fossiles pourraient exacerber les menaces qui planent déjà sur la santé, le bien-être et la souveraineté des communautés autochtones locales.
- Les grandes étendues de terres nécessaires aux solutions naturelles pourraient concurrencer les terres agricoles, ce qui ferait augmenter le coût de la nourriture et compromettrait la sécurité alimentaire, surtout pour les personnes déjà vulnérables comme les ménages à revenu faible et les collectivités éloignées (Fuhrman et coll., 2020).
- Ce système risque aussi de perpétuer plusieurs problèmes environnementaux non liés au climat occasionnés par le système canadien actuel (pollution atmosphérique, dégradation des sols, contamination de l'eau, pénuries d'eau, perte de la biodiversité, destruction d'écosystèmes), particulièrement si la consommation nationale

de combustibles fossiles venait à augmenter. En effet, les émissions négatives permettraient de continuer à utiliser les processus de production existants dans les industries lourdes, ce qui pourrait fragiliser davantage les écosystèmes et menacer l'approvisionnement en eau. Enfin, l'usage répandu de solutions naturelles pourrait encourager des pratiques de monoculture et une utilisation des sols dommageables pour les écosystèmes locaux.

Par ailleurs, cette combinaison de combustibles fossiles et d'émissions négatives comporte son lot d'obstacles majeurs à un déploiement à grande échelle.

Tout d'abord, les technologies nécessaires à l'adoption de solutions techniques à émissions négatives n'en sont qu'à l'étape de démonstration et doivent encore faire leurs preuves sur les plans de la rentabilité et de l'applicabilité à grande échelle. Et même si elles s'avéraient viables, il faudrait construire des infrastructures de captage et de piégeage d'une envergure inégalée, le tout à une vitesse sans précédent. Les investissements et le déploiement généralisés de ces solutions constituent des facteurs centraux, mais hautement incertains de la commercialisation élargie de ces technologies. Les économies d'échelle et la diffusion des connaissances à l'international pourraient aider à diminuer les coûts, mais l'engagement des autres pays envers les solutions techniques à émissions négatives demeure très conjectural.

Il existe aussi de solides barrières non techniques au développement de ce système. Notamment, il faudrait ajuster les systèmes mondiaux de comptabilité des GES de sorte qu'ils reconnaissent les solutions techniques et élaborer un mécanisme d'échange pour fixer les prix des émissions négatives, distribuer des crédits et connecter les vendeurs aux acheteurs. En outre, les responsables des solutions à émissions négatives, techniques ou naturelles, devraient collaborer étroitement avec les peuples autochtones, afin de comprendre et de résoudre les conflits potentiels avec leurs droits et leurs valeurs. L'espace nécessaire à ces solutions – surtout les naturelles – implique

presque inévitablement qu'elles soient déployées sur de nombreux territoires traditionnels autochtones. Le public risque aussi de s'y opposer, puisqu'il considère généralement les émissions négatives comme une façon risquée d'aborder le problème, moins efficace que les réductions à la source. Selon une étude menée récemment aux États-Unis et au Royaume-Uni, la population doute que les technologies à émissions négatives puissent être développées assez rapidement pour résoudre la crise climatique, et elle estime qu'un tel système ne constitue pas une solution suffisamment durable (Cox et coll., 2020).

Enfin, il faudrait répondre à une épineuse question : ne vaudrait-il pas mieux conserver cette capacité de neutralisation pour atteindre les grandes quantités d'émissions négatives nettes qui deviendront vraisemblablement nécessaires dans la deuxième moitié du siècle? Il se pourrait bien que l'utilisation d'émissions négatives pour contrebalancer l'exploitation continue des combustibles fossiles ne fasse que repousser l'inévitable transition vers un autre système, plus durable.

Système basé sur les biocarburants

Le deuxième système carboneutre isolé par notre analyse repose sur les biocarburants et implique un remplacement généralisé des combustibles dans les secteurs de la construction, du transport, de l'électricité et de l'industrie. Il prend principalement appui sur les carburants renouvelables gazeux et liquides de deuxième génération, comme le GNR extrait des déchets de bois et les biocombustibles liquides provenant du panic érigé. La production des matières premières nécessaires requiert aussi d'énormes surfaces de terres. Le grand territoire et les ressources abondantes du Canada en font l'un des rares pays du monde pour lesquels cette trajectoire est viable à grande échelle.

Ce système énergétique a l'avantage de recycler une bonne partie des infrastructures de combustibles fossiles existantes, notamment les raffineries, les pipelines, les systèmes de stockage de carburant

et les réseaux de distribution. Il a aussi le potentiel de générer des émissions négatives, en captant les émissions dues à la combustion des biocarburants, ce qui permettrait de continuer à émettre un certain volume de GES dans les secteurs où il serait trop dispendieux de faire autrement.

Voici ce qu'impliquerait un tel système pour l'économie et la population du Canada :

- ▶ Cette option entraînerait une **croissance économique** considérable dans les secteurs qui produisent les carburants et les matières premières nécessaires à l'utilisation répandue des biocarburants au pays. Elle créerait aussi des perspectives économiques et des emplois locaux dans la production et le raffinage des biocarburants, surtout dans les provinces à capacité de biomasse élevée, comme la Colombie-Britannique, l'Alberta, l'Ontario, le Québec et le Nouveau-Brunswick. Elle pourrait même générer de nouveaux débouchés dans les régions où l'agriculture et le raffinage sont des secteurs importants. Toutefois, les prix des matières premières risquent d'être très variables, ce qui pourrait entraîner des cycles d'expansion et de ralentissement perturbateurs et des fluctuations du chômage, de la santé mentale et du bien-être dans ces régions.
- ▶ Le **potentiel d'exportation des technologies et des services de production des biocarburants risque d'être limité**, car ce système ne pourrait être viable à grande échelle que dans les pays possédant un vaste territoire et une faible densité de population (Russie, Australie, Brésil, etc.). Le potentiel d'exportation des matières premières vers les pays n'ayant pas suffisamment de ressources intérieures serait encore plus limité, parce que le Canada devrait en conserver la majorité pour sa propre production de biocarburants.
- ▶ Le système de biocarburants serait **plus bénéfique pour la santé des Canadiens que la combinaison de combustibles fossiles et**

d'émissions négatives, mais moins que le système d'électrification (voir plus loin). En effet, le remplacement des combustibles fossiles par des biocarburants améliore peu la qualité de l'air et risque même d'accroître les émissions de polluants dangereux (Delucchi, 2006; Hill et coll., 2009; Santé Canada, 2012). Cependant, ce système diminuerait probablement l'utilisation totale d'énergie, ce qui le rendrait meilleur pour la qualité de l'air et la santé que la combinaison de combustibles fossiles et d'émissions négatives. D'après notre analyse, les coûts économiques annuels des décès dus à la pollution atmosphérique diminueraient de 88 % d'ici 2050 avec un tel système (contre 75 % avec le système de combustibles fossiles et d'émissions négatives) (Soltanzadeh et Hakami, 2020).

- ▶ L'énorme superficie nécessaire à ce système entraînerait des **problèmes d'équité et de justice sociale**. Il est fort probable que certaines terres cultivées doivent être converties à la production de matières premières pour biocarburants (à moins que les nombreuses terres agricoles peu productives abandonnées de l'Est ne puissent répondre à la demande), ce qui aurait des répercussions sur la production intérieure de nourriture et les exportations agricoles et pourrait même menacer la sécurité alimentaire et la souveraineté, advenant une hausse des prix ou une baisse de l'accessibilité. Ces changements nous concerneraient tous, mais ce sont les populations les plus vulnérables, comme les ménages à revenu faible et les collectivités éloignées, qui seraient les plus touchées.
- ▶ Ces changements auraient aussi **d'importantes implications pour les droits autochtones**, car l'utilisation de vastes étendues rendrait inévitable l'exploitation de terres situées en territoires traditionnels. Ce système pourrait ouvrir des débouchés économiques locaux aux communautés autochtones, mais risque d'abord d'entrer en conflit avec leur vision du monde et leurs activités traditionnelles.

- En outre, la nécessité de convertir des terres aurait des **répercussions environnementales majeures**, surtout si les matières premières provenaient de monocultures, lesquelles fragilisent les écosystèmes et nuisent à la biodiversité. L'utilisation d'eau dans la production des matières premières pourrait aussi accroître les coûts de renonciation ou occasionner des pénuries, selon le type de culture et la disponibilité d'eau à proximité, et l'usage accru d'engrais dans les cultures pour biocarburants pourrait augmenter la contamination des ressources en eau (Fuhrman et coll., 2020). Enfin, les cultures de matières premières pouvant être détruites par les sécheresses, les inondations et les événements météorologiques extrêmes, les changements climatiques représentent dans ce système une menace pour la sécurité énergétique.

Il existe plusieurs barrières majeures à la prédominance d'un système de biocarburants au Canada.

D'abord, ce mode de production requiert des technologies de production de biocarburants de deuxième génération (dont certaines utilisant de la biomasse cellulosique, comme les déchets de bois et le panic érigé) qui ont encore beaucoup de chemin à faire pour être techniquement et commercialement viables. De plus, il pourrait être plus difficile de diminuer les coûts que pour les autres systèmes, car la plupart des pays n'ont pas suffisamment de biomasse pour permettre les économies d'échelle et la diffusion des connaissances nécessaires. Ainsi, le Canada serait potentiellement le seul à travailler pour rendre les biocarburants viables (contrairement aux autres solutions, surtout celles visant l'électrification et l'utilisation d'hydrogène)⁴¹.

Le système basé sur les biocarburants requerrait aussi de gros investissements dans les infrastructures de production, voire le renouvellement complet du stock de capital dans certains scénarios.

La production de matières premières pourrait aussi se heurter à des contraintes en raison de l'utilisation des terres à d'autres fins limitant l'espace disponible (Johansson et coll., 2012). À noter que la conversion de terres risque également d'avoir des conséquences sur les droits des Autochtones et d'entrer en conflit avec leurs perspectives sur la façon de combattre les changements climatiques.

Système basé sur l'électrification et l'hydrogène

Le troisième système carboneutre potentiel isolé dans notre analyse repose sur l'électrification et l'hydrogène, priorisant la production d'électricité sans émission. L'hydrogène serait réservé à certaines applications précises, comme le transport de marchandises et les processus industriels difficiles à électrifier, tandis que le transport individuel, le chauffage, le refroidissement et tout le reste de la production industrielle se tourneraient largement vers l'électrification.

Dans ce système, l'électricité serait majoritairement produite à partir de sources renouvelables telles que l'énergie éolienne, solaire et hydroélectrique. Le Canada pourrait aussi avoir recours aux combustibles fossiles (avec des mécanismes de CUSC⁴²), à l'énergie nucléaire (p. ex., petits réacteurs modulaires) et à des technologies d'énergie renouvelable émergentes, comme le géothermique (voir l'encadré 11). La sélection exacte de solutions dépendra de l'évolution des technologies et, probablement, des particularités de chaque région, notamment les ressources disponibles et les choix politiques.

Le reste de l'énergie proviendrait d'hydrogène vert (produit par électrolyse avec de l'électricité renouvelable) ou bleu (par transformation de gaz naturel et piégeage des émissions avec des technologies

41 L'adoption des biocarburants dans d'autres pays pourrait même faire augmenter les coûts du système, particulièrement si la demande américaine en matières premières locales faisait croître les prix. Ce phénomène pourrait se produire si d'autres pays (comme les États-Unis) décidaient d'emboîter le pas au Canada dans leur propre transition vers la carboneutralité.

42 Dans certains cas, 10 % des émissions peuvent échapper au CUSC. Elles devront être compensées par des émissions négatives pour assurer la carboneutralité de cette méthode de production.

de CUSC⁴³). L'hydrogène servirait aussi au stockage d'énergie : les surplus de sources intermittentes comme l'éolien et le solaire seraient convertis en hydrogène, qui pourrait alors être immédiatement brûlé ou conservé pour les moments où les sources intermittentes produisent moins.

Voici ce qu'impliquerait un tel système pour l'économie et la population du Canada :

- ▶ Cette option requiert un **plus grand remaniement de la structure économique** que les deux autres, car c'est celle qui s'éloigne le plus du système existant. Elle n'emploie pas de combustibles fossiles et délaisse la majeure partie des infrastructures qui servent actuellement à les produire, à les transporter et à les distribuer.
- ▶ Bien qu'ils soient perturbateurs, ces changements structuraux représentent une **excellente occasion de diversifier l'économie**. Les retombées seraient particulièrement importantes dans l'Ouest du Canada, où le potentiel d'énergie renouvelable est suffisant pour produire de l'hydrogène vert et où les ressources en gaz naturel et les caractéristiques géologiques permettent la production d'hydrogène bleu. Les provinces axées sur l'hydroélectricité comme le Québec et le Manitoba pourraient aussi convertir leurs surplus en hydrogène vert.
- ▶ Ce système pourrait également **ouvrir des débouchés internationaux** dans l'exportation de technologies et de savoir entourant l'énergie renouvelable, l'électrification finale et la gestion des réseaux électriques. Le Canada pourrait en outre exporter directement son électricité propre aux États-Unis, en exploitant les interconnexions nord-

sud existantes, et fournir en hydrogène les gros importateurs potentiels comme les États-Unis, le Japon, la Corée du Sud et l'Allemagne (Layzell et coll., 2020).

- ▶ Il s'agit aussi du **système le plus prometteur des trois pour la qualité de l'air**. Ne reposant ni sur les combustibles fossiles ni sur les biocarburants, il éliminerait presque entièrement la pollution atmosphérique associée à la production et à l'utilisation d'énergie⁴⁴. Et puisque la combustion d'hydrogène ne rejette que de l'eau, elle ne créerait quasiment aucune émission polluante⁴⁵. Toutefois, la pollution atmosphérique demeurera un problème peu importe le système choisi en raison des changements climatiques qui continueront d'engendrer de la pollution, notamment en faisant augmenter la température et la fréquence et l'intensité des feux incontrôlés (ce qui peut accroître la concentration d'ozone troposphérique).
- ▶ L'électrification et l'emploi d'hydrogène auraient des **répercussions complexes sur les Canadiens à revenu faible**. Dans l'ensemble, elles permettraient de réduire les coûts pour les ménages, mais ces économies requerraient de gros investissements initiaux que les familles moins fortunées pourraient avoir du mal à réaliser sans subvention gouvernementale ni mécanisme de financement équitable⁴⁶. La transition pourrait aussi être plus difficile dans les collectivités rurales et éloignées, qui dépendent généralement plus des combustibles fossiles. Même si l'électrification venait à se répandre, les zones rurales peu peuplées conserveraient probablement un certain retard sur les grands centres urbains quant à l'accessibilité des solutions électriques (Krechowicz, 2011).

43 Dans certains cas, 10 % des émissions peuvent échapper au CUSC. Elles devront être compensées par des émissions négatives pour assurer la carboneutralité de la production d'hydrogène bleu.

44 Dans les cas où l'électricité continuerait à être produite à partir de combustibles fossiles, des technologies de CUSC seraient employées pour piéger la plupart des polluants atmosphériques libérés.

45 Puisque notre modèle ne nous permet pas d'évaluer exactement le plein potentiel de ce système, nous ne pouvons pas quantifier l'amélioration de la qualité de l'air comme nous l'avons fait avec les deux autres systèmes, mais nous estimons que les avantages pour la santé seraient beaucoup plus importants pour celui-ci, car il permettrait de réduire davantage la pollution atmosphérique.

46 Bien que les trois systèmes carboneutres exigent d'importants investissements en capital, l'électrification et l'emploi d'hydrogène demandent une plus grande contribution des citoyens, qui doivent se doter de technologies alimentées à l'électricité. Pour que les ménages à revenu faible puissent participer à la transition et en bénéficier autant que les autres, le gouvernement devrait probablement mettre en place des politiques de soutien, des solutions de financement novatrices ou les deux.

► **Les répercussions environnementales non liées au climat de ce système varieraient selon les sources d'électricité et les méthodes de production d'hydrogène choisies.**

Par exemple, les installations solaires et éoliennes ont généralement peu de répercussions, tandis que les barrages hydroélectriques peuvent avoir des effets considérables sur la biodiversité et les écosystèmes locaux. Les conséquences environnementales de l'utilisation d'hydrogène dépendraient aussi des modes de production employés; certains demandent un plus grand volume d'eau entrante, ce qui influe sur la disponibilité des ressources locales différemment selon les conditions régionales. La production d'hydrogène bleu, qui utilise du gaz naturel comme matière première, aurait des répercussions à l'échelle locale. Par ailleurs, le déploiement des infrastructures de production d'électricité et d'hydrogène demanderait parfois beaucoup d'espace (ou une infrastructure de transport à longue distance), ce qui aurait des implications pour les droits autochtones.

► **La résilience aux changements climatiques varie aussi entre les différents réseaux de production, de transmission et de distribution de l'électricité.**

Les réseaux de transmission et de distribution centralisés sont souvent plus vulnérables aux conséquences des changements climatiques (hausse des températures, vents violents, feux incontrôlés, tempêtes de verglas, inondations) et subissent davantage d'interruptions de l'approvisionnement. Les changements climatiques pourraient aussi engendrer des coûts particulièrement élevés en l'absence de mesures d'adaptation pour protéger les poteaux électriques en bois et les transformateurs de postes électriques. Enfin, certains modes de production sont plus à risque que d'autres; par exemple, la production d'hydroélectricité est influencée par la configuration des pluies et les sécheresses (Allen-Dumas et coll., 2019).

Le déploiement de l'électrification et de l'utilisation d'hydrogène se confronte à trois grands obstacles.

Premièrement, la mise en œuvre d'un tel système requerrait d'importants investissements en capital. Il faudrait notamment : accroître sensiblement la capacité des infrastructures de production et de transmission; remplacer les technologies finales conçues pour les combustibles fossiles par des technologies à l'électricité; construire pour le secteur du transport des marchandises un réseau de production, de transport et de stockage de l'hydrogène, comprenant des pipelines et des centres de distribution; et moderniser ou remplacer de l'équipement, notamment les chaudières.

Deuxièmement, les coûts potentiels sont élevés. Les frais de production et de distribution d'hydrogène et les prix des technologies finales devront fortement baisser pour que ce système puisse être déployé à grande échelle. Et bien que l'énergie renouvelable et beaucoup de technologies à l'électricité soient déjà efficaces, les tarifs aux consommateurs devront demeurer bas pour assurer une électrification rapide et généralisée. Mais cela implique d'abord de réduire considérablement les coûts associés aux sources stables d'énergie propre (voir l'encadré 11).

Troisièmement, la logistique de ce système est hautement complexe. Pour rendre possible l'électrification à grande échelle, il faudrait réaliser une multitude de projets de production et de transmission, ayant chacun ses propres processus de conception et d'approbation. Les services publics et les exploitants de réseaux électriques devraient aussi apprendre à gérer une relation entre l'offre et la demande beaucoup plus délicate. Pour soutenir et encourager la transition, il leur faudrait peut-être même réviser mandats et modèles d'affaires. Une meilleure intégration des réseaux électriques, des marchés et des systèmes réglementaires régionaux pourrait aussi s'avérer nécessaire, ce qui apporterait tout un lot d'embûches et de difficultés majeures et pourrait même requérir l'établissement d'interconnexions régionales est-ouest.

5.3 PRINCIPAUX FACTEURS DE LA CARBONEUTRALITÉ AU CANADA

Puisque certains des facteurs qui influenceront sur la trajectoire du Canada vers la carboneutralité sont hors du contrôle du pays, le choix de notre futur système énergétique ne sera pas entièrement le nôtre, ce qui ne signifie toutefois pas que nous devons nous en remettre complètement à ces forces externes. Les avantages et les inconvénients de chaque système auront des répercussions pour les Canadiens, et les différences dans la transition appelée par chacun pèseront considérablement sur l'économie, la santé, la société et l'environnement. Les ménages, les entreprises, les gouvernements et les communautés autochtones devront mûrement réfléchir leurs décisions, et il faudra soigneusement considérer les incertitudes et les risques à mesure qu'évolueront les tendances, les avancées internationales et les priorités du pays.

Le tableau 1 résume certaines des conditions principales à l'émergence des trois systèmes énergétiques

et survole les grandes questions concernant les attraits relatifs de chacun.

Le Canada devra tenir compte de tout un éventail de facteurs dans sa décision : distribution des ressources (ressources naturelles, capital bâti et capital humain); stratégie industrielle et avantages comparatifs potentiels dans un monde en pleine décarbonisation; répercussions positives et négatives sur les ménages de tous les revenus et de toutes les régions; implications pour les communautés autochtones; et perspectives des citoyens, des entreprises, des titulaires de droits et des parties prenantes. Les trois systèmes proposés présentent des inconvénients et des obstacles importants à un déploiement à grande échelle. Peu importe la ou les trajectoires que décidera d'emprunter le Canada, la transition sera complexe et difficile et requerra d'importants investissements dans le développement des solutions parisiennes. Cependant, elle ouvrira aussi des débouchés dont nous pourrions tirer parti en faisant des choix réfléchis et stratégiques.

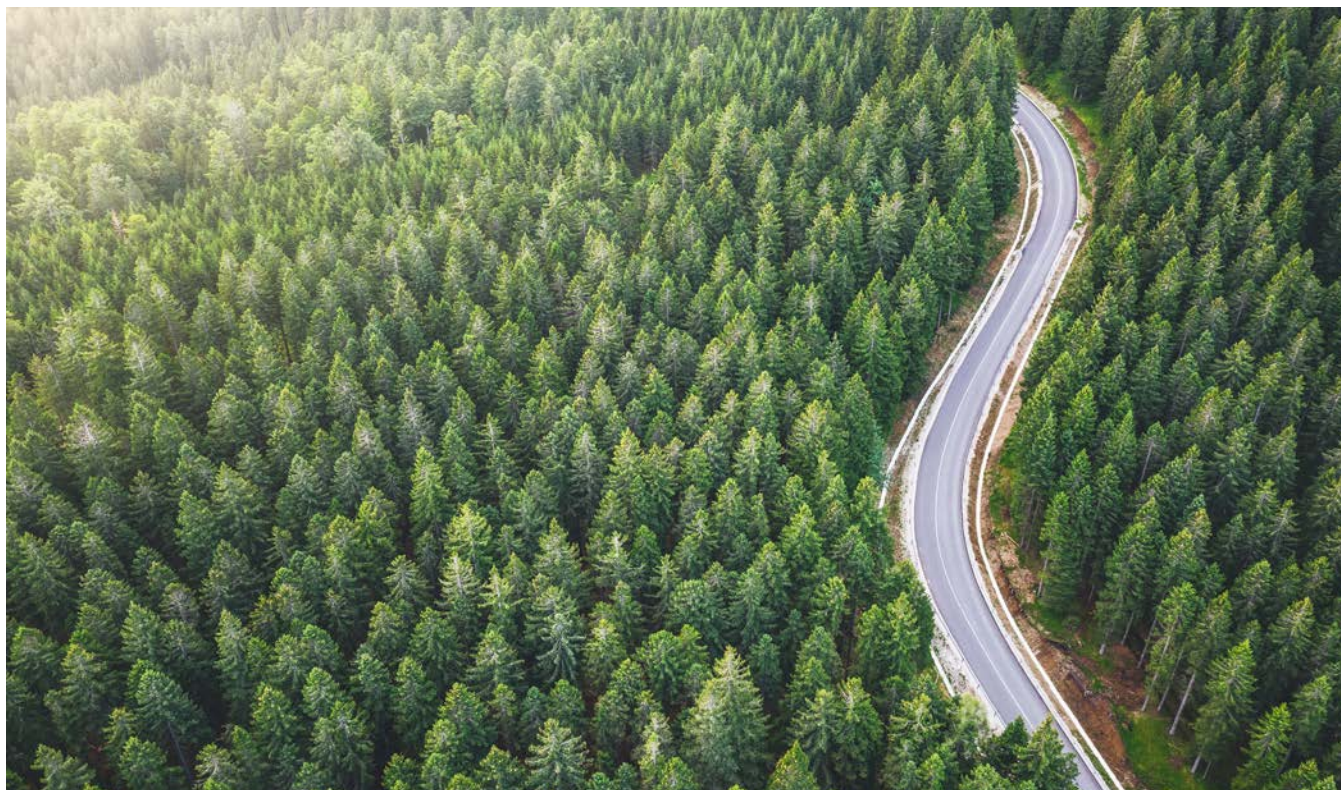


Tableau 1 : Conditions principales et grandes questions entourant le déploiement à grande échelle de trois systèmes énergétiques carboneutres potentiels pour le Canada

	Combustibles fossiles et émissions négatives	Biocarburants	Électrification et hydrogène
Facteurs que le Canada peut contrôler	Développement des infrastructures du pays (p. ex., pipelines de transport de CO ₂ , installations de CUSC)	Priorités d'aménagement des terres et potentiel de production à grande échelle de matières premières pour biocarburants de deuxième génération Développement des infrastructures (p. ex., capacité de production de biocarburants)	Renforcement de la capacité nationale de production et de transmission d'électricité Développement des infrastructures (p. ex., réseaux électriques, pipelines de transport d'hydrogène, centres de distribution) Réforme des marchés de l'électricité
Facteurs hors du contrôle du Canada	Envergure du déploiement international de solutions à émissions négatives techniques Mécanismes d'échange international des émissions négatives	Viabilité technique finale des biocarburants de deuxième génération	Innovation et déploiement sur la scène internationale dans les domaines de la production d'électricité, des réseaux électriques et des technologies finales propres Demande internationale d'hydrogène à émissions faibles ou nulles
Grandes questions	Qu'impliquerait le choix de cette option pour la transition inévitable, dans la deuxième moitié du siècle, vers un système à émissions négatives nettes? Dans quelle mesure devons-nous tenir compte, dans la décision finale, des répercussions (p. ex., sur la santé) de l'utilisation continue des combustibles fossiles?	Le Canada doit-il considérer, dans sa décision, le fait que les autres pays sont peu susceptibles d'emprunter cette trajectoire? Quelles seraient les répercussions des grands besoins en terrains de ce système, notamment sur les droits autochtones?	Le Canada doit-il considérer, dans sa décision, le potentiel d'exportation qu'offrirait ce système? Quels facteurs pourraient empêcher le pays de se lancer sur le marché international? Quelles sont les implications de la logistique complexe d'un tel système?
	• Les politiques climatiques du Canada (à tous les ordres de gouvernement) encourageront-elles l'emploi d'un système carboneutre unique ou l'amalgamation de différents systèmes selon les besoins des régions et des secteurs? Le Canada travaillera-t-il à assurer l'intercompatibilité de ses divers systèmes énergétiques et à exploiter le potentiel des interconnexions (à l'échelle du pays ou avec les États-Unis)? Comment le Canada conciliera-t-il sa gouvernance décentralisée (surtout vis-à-vis de l'énergie) avec le besoin d'employer une approche cohérente partout au pays pour concrétiser la mise en œuvre d'un ou de plusieurs systèmes carboneutres?		



CONCLUSIONS PRINCIPALES

Dans ce rapport, nous avons exploré différentes trajectoires possibles vers la carboneutralité ainsi que le rôle de diverses technologies et solutions dans l'atteinte de cet objectif. Nous avons aussi examiné les implications de plusieurs trajectoires ou systèmes pour les Canadiens ainsi que les grands obstacles propres à chacun. De cette analyse, nous tirons huit conclusions principales.

La carboneutralité est atteignable, mais nécessite des politiques fortes

Notre analyse nous a permis d'isoler *plus d'une* trajectoire potentielle vers la carboneutralité répondant aussi aux objectifs intermédiaires pour 2030. Nous les avons comparées en nous assurant de la logique et de la cohérence interne des hypothèses de chacune, en tenant compte tant des décisions intérieures que des facteurs externes hors du contrôle du Canada. Certains de ces éléments pourraient faire en sorte qu'une trajectoire ou une autre ne soit pas viable, mais le pays dispose de suffisamment d'options pour que nous puissions considérer la carboneutralité comme atteignable.

Mais cela ne garantit pas qu'elle devienne réalité; sa concrétisation requerra des politiques fortes. Le nouveau plan climatique du fédéral nous met sur la bonne voie pour atteindre la cible de 2030, et il ne tient

qu'aux autres ordres de gouvernement de renforcer leurs politiques pour accroître les réductions. La mise en œuvre de ce plan et l'ambition des divers ordres de gouvernement joueront un rôle crucial dans l'adoption généralisée des valeurs sûres qui permettront de respecter les objectifs pour 2030 et 2050.

Pour atteindre ses cibles ambitieuses, le Canada aura probablement aussi besoin de solutions parisi risquées, dont la viabilité dépendra en partie des initiatives étrangères encourageant l'innovation – et de l'évolution consécutive des marchés et des technologies. Le contexte international n'est cependant pas une excuse pour attendre. Si le pays veut réaliser ses objectifs et opérer des changements sur les marchés mondiaux, il doit dès maintenant adopter des politiques assurant le développement des valeurs sûres et des solutions parisi risquées, de sorte à suivre les transformations internationales qui sont hors de son contrôle.

Les grandes transitions sont inévitables, surtout avec les tendances internationales

La transition vers la carboneutralité entraînera des changements de taille dans la structure économique du pays. Les trajectoires que nous avons présentées misent sur des approches radicalement nouvelles pour plusieurs activités : production et consomma-

tion d'énergie, chauffage des bâtiments, transport des personnes et des marchandises et fourniture des produits et des services essentiels à l'économie du Canada. Ces changements ne seront pas sans coût pour les industries existantes, et ce, malgré les nouvelles possibilités qu'ils apporteront. Ils auront aussi des effets distributifs majeurs (répartition des coûts et des avantages entre les régions, les secteurs et les ménages).

Toutefois, bon nombre des difficultés associées à cette transition évolueront indépendamment des choix politiques et des initiatives de carboneutralité du Canada. Notamment, les dynamiques des marchés et les politiques climatiques internationales pourraient faire chuter la demande de pétrole. Ces facteurs, sur lesquels nous avons peu de contrôle, pourraient chambouler la structure économique des régions qui exploitent ce produit.

Avec des changements économiques structuraux d'une telle envergure viennent plusieurs défis à relever. Cependant, les trois systèmes proposés ouvriront aussi de nouveaux débouchés, en particulier dans les régions productrices de pétrole. Le Canada devra savoir en tirer parti pour assurer une transition en douceur aux travailleurs et aux collectivités des régions les plus à risque de perturbations. La planification des changements doit commencer dès maintenant, pour encourager la diversification économique et soutenir les plus vulnérables.

Le Canada a des avantages concurrentiels dans la poursuite de la carboneutralité

Le Canada est particulièrement bien placé pour tirer profit des perspectives ouvertes par les initiatives de réduction des émissions menées ici et à l'étranger. Il pourrait notamment devenir l'un des principaux fournisseurs de minéraux et de métaux nécessaires à la production de nombreuses technologies propres qui seront très courues dans les pays souhaitant réduire leurs émissions (p. ex., batteries de véhicules électriques). Il existe déjà de belles occasions dans le secteur sobre en carbone qu'est celui de l'électricité, notamment l'exportation d'aluminium à faibles émis-

sions, et la transition ne fera qu'en apporter encore plus, par exemple la production et l'exportation d'hydrogène vert dans les provinces riches en hydroélectricité comme le Manitoba et le Québec. En outre, les provinces à capacité de biomasse élevée (Colombie-Britannique, Alberta, Ontario, Québec et Nouveau-Brunswick) pourraient bénéficier de nouvelles perspectives économiques dans la production et le raffinage de biocarburants.

La transition vers la carboneutralité sera aussi l'occasion pour les régions productrices de pétrole et de gaz de faire croître et de diversifier leur économie. En effet, les secteurs industriels émergents – hydrogène, biocarburants, solutions à émissions négatives techniques, CUSC – pourraient tirer parti des infrastructures, des ressources et du savoir-faire existants de ces régions, et les sociétés pétrolières et gazières pourraient se convertir à ces secteurs.

Le Canada jouit également d'avantages uniques dans les trois systèmes potentiels examinés; ses ressources, son infrastructure et son savoir-faire lui confèrent une facilité d'adaptation que bien d'autres pays n'ont pas. Enfin, peu importe la trajectoire qu'il empruntera, le Canada devrait découvrir de nouveaux débouchés à l'exportation aux quatre coins du monde, à mesure que les autres pays entreprendront leur propre transition vers la carboneutralité.

L'utilisation à grande échelle des «valeurs sûrs» est crucial, et il n'y a aucune raison de retarder

Notre analyse a révélé qu'il existait déjà sur le marché de nombreuses technologies et solutions pouvant être appliquées à grande échelle pour réduire les émissions. Dans tous les scénarios étudiés, au moins 64 % des réductions possibles d'ici 2030 étaient attribuables à ces valeurs sûres. Leur importance était constante, surtout à court et à moyen terme. Parmi les principales stratégies, notons l'amélioration de l'efficacité énergétique, la production d'électricité propre et l'adoption de thermopompes et de véhicules électriques.

Selon nos résultats, l'incertitude et les risques entourant les solutions paris risqués et les initiatives climatiques internationales n'influent en rien sur le rôle des valeurs sûres ou la capacité du Canada à atteindre sa cible de 2030. Il vaut toutefois mieux agir rapidement, car plus nous attendrons, plus les coûts de la transition et les risques d'actifs délaissés seront élevés.

À court terme, les décideurs peuvent faire confiance aux valeurs sûres. Orienté dans ce sens, le nouveau plan climatique du gouvernement fédéral, annoncé en fin d'année dernière, prévoit l'augmentation de la tarification du carbone à 170 \$ par tonne d'ici 2030. Ce sont de telles politiques incitatives qui encourageront les entreprises et les ménages à adopter les valeurs sûres rapidement.

Les solutions « paris risqués » influenceront grandement sur la transition du Canada vers la carboneutralité

Il faut comprendre que les paris risqués viennent compléter – et non remplacer – les valeurs sûres. En effet, ces dernières sont centrales dans l'atteinte de la carboneutralité, d'où la nécessité de poursuivre leur développement en priorité. Les solutions paris risqués, elles, servent plutôt à multiplier les possibilités d'accroître ou de rentabiliser les réductions des émissions à long terme (ou même à créer des occasions d'exportation). Bien que beaucoup de ces solutions aient des désavantages et que toutes doivent surmonter d'importants obstacles avant d'être viables à grande échelle, elles ont le potentiel de transformer foncièrement la transition du Canada.

Nous devons agir maintenant pour nous assurer que les paris risqués seront prêts lorsque nous en aurons besoin. Sinon, le bassin d'options sera réduit et la transition risque de subir des retards coûteux. L'avancement de ces solutions requerra la mise en œuvre de politiques et l'appui du gouvernement, sous forme de recherche et développement, de démonstrations et de projets pilotes, de mesures incitatives, d'initiatives internationales de collabo-

ration ou même d'investissements publics directs. Toutefois, il faudra soigneusement considérer les risques et l'incertitude qui entourent les paris risqués, car un mauvais choix de trajectoire pourrait augmenter substantiellement les coûts et nuire aux efforts du Canada, dans l'éventualité où les facteurs externes ne correspondraient pas aux projections.

Les «valeurs sûrs» et les «paris risqués» doivent être considérés séparément

Le potentiel des paris risqués ne signifie pas qu'il faille attendre avant d'entreprendre la transition vers la carboneutralité. Même dans les scénarios où les solutions à émissions négatives techniques occupent une place de choix, les valeurs sûres maintiennent une importance considérable, surtout avant 2030.

Trop souvent, le Canada s'est retrouvé devant une impasse à la suite de débats politiques confondant les avantages et les désavantages des valeurs sûres et des paris risqués. Même si le développement de ces deux types de solutions présente des obstacles semblables, notre analyse indique qu'il vaut mieux les considérer séparément dans les débats.

En mettant trop l'accent sur les paris risqués, les décideurs risqueraient de négliger les mesures et les investissements à court terme essentiels à l'avancée des valeurs sûres. Bien qu'il existe des raisons de développer les deux types de solutions en même temps, ils présentent des enjeux politiques distincts. L'avenir des valeurs sûres est clair : les technologies sont déjà sur le marché, et les obstacles au déploiement sont majoritairement gérables. On ne peut pas en dire autant des paris risqués. En effet, l'incertitude et les risques qui les entourent sont beaucoup plus grands, et les défis et les enjeux, complètement différents. L'élaboration de politiques à leur sujet est aussi plus difficile, car le Canada n'a pas le plein contrôle de tous les facteurs influant sur leur adoption et leur déploiement, et les décisions internationales peuvent être aussi cruciales que les choix intérieurs.

Pour assurer la réussite de la transition vers la carboneutralité, les décideurs devront composer simultanément avec les défis aux antipodes que présentent les valeurs sûres et les paris risqués. Ils devront aller de l'avant avec les valeurs sûres, qui apporteront une contribution majeure à la cible de 2030 et nous rapprocheront de celle de 2050, tout en rassemblant les conditions nécessaires au développement, au déploiement et à l'adoption des paris risqués.

Les solutions à émissions négatives techniques sont différentes des autres « paris risqués »

La mise en œuvre d'un système reposant sur les combustibles fossiles et les solutions à émissions négatives techniques peut sembler une option attrayante pour atteindre la carboneutralité, car elle requiert bien moins de changements économiques structuraux que les autres. Il faut toutefois jouer de prudence, pour plusieurs raisons.

D'abord, les solutions à émissions négatives techniques sont séduisantes, mais risquées. Elles permettent de maintenir les approches de production existantes (p. ex., activités hautement émettrices) et de préserver grosso modo la structure économique actuelle. Cependant, advenant l'échec de leur déploiement, le Canada prendrait du retard dans la réduction de ses émissions et dans son remaniement structurel, ce qui augmenterait considérablement les coûts de la transition. Le pays pourrait même totalement rater sa cible, contribuant alors à exacerber les changements climatiques à l'échelle internationale, directement (en augmentant ses émissions) et indirectement (en diminuant sa capacité à inspirer le mouvement mondial et à donner l'exemple). Un tel échec pourrait

aussi pousser les pays qui réussissent mieux à imposer des sanctions commerciales au Canada (p. ex., les ajustements carbone aux frontières considérés par l'Union européenne).

En outre, il existe de nombreux obstacles majeurs au déploiement généralisé d'un tel système. En effet, la rentabilité et l'applicabilité à grande échelle des solutions à émissions négatives techniques restent à prouver, ce qui est loin d'être évident. La construction d'installations et la mise en place de technologies devraient aussi se faire dans une envergure et à une vitesse sans précédent ou presque, sans compter les risques élevés d'opposition du public et notamment des communautés autochtones, dont les territoires traditionnels devraient être utilisés.

Parallèlement, les émissions négatives présentent certains avantages non négligeables :

- ▶ Limiter les réductions trop complexes ou coûteuses (p. ex., dans les industries lourdes) en compensant dans d'autres sphères de l'économie
- ▶ Tirer parti des infrastructures et du savoir-faire canadiens existants
- ▶ Compenser les échecs ou les retards imprévus dans la réduction des émissions ailleurs dans l'économie
- ▶ Contribuer à la transition non seulement vers la carboneutralité, mais aussi vers des émissions négatives nettes, qui pourraient s'avérer nécessaires pour stabiliser le climat mondial malgré les vastes réductions réalisées dans le reste de l'économie

Les solutions à émissions négatives fonctionnent mieux en tant que compléments d'autres solutions (surtout de valeurs sûres) qu'en tant que solutions autonomes.

Les trajectoires vers 2050 ont des répercussions sur le bien-être des Canadiens

Alors que les gouvernements et les citoyens du pays tout entier cherchent à contrôler la pandémie de COVID-19 et ses retombées économiques, il peut sembler inopportun de considérer la prospérité et le bien-être des Canadiens de 2050. Cependant, les choix d'aujourd'hui – les politiques, les investissements et les initiatives que nous prioriserons après la pandémie – auront de grandes conséquences.

Bien gérée, la transition vers un système carboneutre ne devrait pas nuire à la prospérité ni au bien-être des citoyens. Elle pourrait même les augmenter, à l'instar de la qualité de l'air et des conditions sanitaires, et réduire les dépenses énergétiques de la plupart des ménages. Mais nous devons faire des efforts particuliers pour que tous profitent également des politiques climatiques et que la transition s'opère dans le respect des droits autochtones et des principes de réconciliation.

Dans sa course vers la carboneutralité, le Canada devra veiller à ce que ses citoyens ne perdent pas les emplois et les revenus dont ils ont besoin pour prospérer. Pour ce faire, les décideurs devront viser la rentabilité maximale et éviter les mesures dispendieuses ou inefficaces qui risquent de plomber inutilement l'économie. Ils devront aussi offrir un soutien tout au long de la transition, pour éviter que quiconque passe entre les mailles du filet.

La pandémie de COVID-19 a démontré toute l'importance de la préparation et de la collaboration pour résoudre les problèmes collectifs. Les changements climatiques et la transition vers la carboneutralité s'accompagneront indéniablement de difficultés sociales et de bouleversements majeurs, mais en passant aux actes dès maintenant, le Canada pourra en limiter les effets négatifs (et créer de nouvelles occasions de prospérer).



À la lumière des conclusions qui précèdent, nous formulons les quatre recommandations suivantes :

1. Tous les ordres de gouvernement devraient resserrer leurs politiques afin d'encourager le déploiement à grande échelle des valeurs sûres

La transition vers la carboneutralité se fera en plusieurs petites étapes. Pour atteindre ses objectifs de 2030 et de 2050, le Canada devra d'abord développer davantage les valeurs sûres isolées dans l'analyse. En effet, il n'y a pas lieu de retarder leur déploiement, peu importe le potentiel à long terme des solutions parisiennes. Un tel report serait coûteux, et il existe déjà de nombreuses solutions fiables, dont certaines extrêmement prometteuses à court terme : augmentation de l'efficacité énergétique, emploi d'électricité propre, utilisation de thermopompes et de véhicules électriques, réduction des émissions de méthane associées à la production de pétrole et de gaz, réduction des hydrofluorocarbures et solutions de CUSC pour les flux gazeux concentrés.

Les politiques du pays devront être claires et comporter de puissants incitatifs économiques à la mise en œuvre

des valeurs sûres. L'architecture de politique nécessaire est déjà en place. Il ne reste qu'à saisir l'occasion d'encourager et d'accélérer l'élaboration de règlements flexibles (Norme sur les combustibles propres du fédéral, norme de carburant à faible teneur en carbone de la Colombie-Britannique, mandats de véhicules zéro émission du Québec et de la Colombie-Britannique, etc.), de renforcer les codes du bâtiment et d'accroître la rigueur de la tarification du carbone, selon le nouveau plan fédéral.

Nous ne pouvons formuler de recommandations concernant des outils ou des règlements en particulier. Les options sont nombreuses, et les gouvernements devront faire leurs propres choix, selon les conditions et les priorités qui leur sont propres. L'essentiel est que chacun fasse preuve d'une rigueur suffisante, coordonnée et prévisible, afin d'assurer le déploiement à grande échelle des valeurs sûres. Dans ce processus, les gouvernements devront porter une attention particulière à la cohérence de leurs politiques, à défaut de quoi elles pourraient perdre de leur efficacité ou avoir des conséquences indésirables.

2. Les gouvernements devraient privilégier une approche par portefeuille pour gérer les risques et les attraits des solutions « paris risqués »

Seules, les valeurs sûres ne suffiront pas à atteindre la carboneutralité; s'il souhaite réaliser des réductions importantes à moindre coût, le Canada devra mobiliser le potentiel des paris risqués. Cette tâche ne sera cependant pas des plus aisées, car les trois systèmes énergétiques étudiés requièrent des innovations, des changements stratégiques, et des investissements majeurs en ce qui concerne les technologies émergentes ou les infrastructures.

Les choix politiques peuvent faciliter la levée des obstacles s'opposant à chaque système, mais pas en éliminer complètement les risques. Afin de gérer ces derniers, le Canada devra investir dans de multiples paris risqués (sans toutefois trop diluer des ressources)⁴⁷. Il devra également créer un environnement qui facilite l'innovation, favorise le développement et le déploiement des technologies émergentes et encourage l'implication du secteur privé et de la société civile, tout en demeurant suffisamment flexible pour s'adapter à des évolutions technologiques et internationales imprévisibles.

Le présent rapport ne cherche pas à fournir de recommandations quant aux solutions paris risqués ou aux systèmes énergétiques à prioriser. Il vise plutôt à alimenter des conversations avec le secteur industriel, les représentants autochtones, les syndicats et les citoyens canadiens concernant la viabilité et les attraits de chaque option. Ces conversations devraient servir à déterminer les priorités qui permettront d'atteindre la carboneutralité désirée tout en procurant divers avantages sociaux, économiques et environnementaux. Elles devraient en outre suivre (et alimenter) le dialogue international.

3. Afin de renforcer la stabilité politique, les gouvernements devraient adopter de solides cadres de responsabilisation climatique

Les gouvernements peuvent utiliser l'infrastructure existante – surtout les politiques qui sont générales et flexibles sans être laxistes – pour préparer le terrain aux innovations à long terme et au déploiement des paris risqués. Il est particulièrement important que les attentes quant à la rigueur des politiques futures soient claires. De telles attentes peuvent constituer de puissants incitatifs à l'innovation, en anticipant la demande de technologies, de pratiques et de nouvelles solutions pour réduire les émissions. Ainsi, il y aurait lieu d'établir des cadres de responsabilisation climatique présentant des étapes réalistes et prévoyant des incitatifs pour atteindre la carboneutralité à long terme.

Un cadre de responsabilisation climatique est un ensemble de structures et de processus de gouvernance faisant le lien entre les cibles d'émissions à long terme et les politiques à court terme, grâce à des bilans et à des rapports réguliers et transparents (Beugin et coll., 2020). Un tel cadre aide à planifier le resserrement des politiques, en découpant le long processus en petites étapes simples et distinctes, ainsi qu'à assurer la constance de ce resserrement à long terme, en plaçant des jalons tout le long de la route vers la carboneutralité. Il facilite également la concrétisation des objectifs en assurant au public un suivi transparent et indépendant des mesures climatiques et des engagements politiques des gouvernements.

Les processus de responsabilisation permettent aussi d'ajuster le tir au besoin. En mesurant régulièrement les progrès accomplis, nous serons plus à même de déterminer les mesures nécessaires à court et à moyen terme et de gérer les incertitudes liées à l'évolution des paris risqués.

⁴⁷ Pensons notamment ici aux solutions à émissions négatives : s'il y a lieu d'encourager l'innovation et de faciliter le déploiement de telles technologies dans le cadre d'une approche par portefeuille, cela doit se faire en complément plutôt qu'en remplacement d'autres mesures.

En fin d'année dernière, le gouvernement fédéral a déposé la *Loi canadienne sur la responsabilité en matière de carboneutralité* (projet de loi C-12), qui vise à établir un cadre de responsabilisation climatique national. Le projet de loi comprend bon nombre des éléments essentiels à la solidité d'un tel cadre, notamment la consultation d'experts indépendants, l'établissement de cibles d'émissions intermédiaires et le dépôt régulier de bilans et de rapports transparents. Il y aurait toutefois matière à renforcer les mesures visant la responsabilisation et la stabilité ainsi qu'à impliquer les autres ordres de gouvernement dans l'atteinte des objectifs climatiques nationaux. Ces changements permettraient de mettre davantage en lumière la nécessité et l'importance des paris risqués.

Dans une même veine, les autres ordres de gouvernement pourraient créer leurs propres cadres de responsabilisation pour fixer des attentes provinciales, territoriales et municipales, ou établir des approches autochtones. Une telle transparence généralisée quant aux attentes et aux politiques pourrait aussi susciter de difficiles conversations sur la coordination intergouvernementale.

4. Les gouvernements devraient veiller à ce que la transition vers la carboneutralité soit équitable et inclusive

Regardless of which path Canada takes to net zero, Peu importe la trajectoire qu'empruntera le Canada, il devra explicitement aborder les enjeux distributionnels dans ses politiques. La justice et l'équité n'accompagneront pas forcément la réduction des émissions, et sans mesures de soutien réfléchies, le processus de transition risque même d'exacerber les inégalités et les injustices actuelles.

Les divers ordres de gouvernement devront soutenir les ménages à revenu faible pour éviter que les politiques climatiques aient des conséquences disproportionnées sur leurs dépenses et leur bien-être ou que la

transition les laisse en reste. Ils devront aussi appuyer les travailleurs des secteurs et des régions qui subiront le plus de changements, de même que contribuer directement à la transition des communautés rurales, éloignées et autochtones, afin de les aider à surmonter les obstacles structurels à la prospérité et à l'autosuffisance.

Il est primordial que les gouvernements saisissent tous les effets de la transition sur l'ensemble des régions, des secteurs, des travailleurs, des collectivités et des tranches de revenus du Canada, à défaut de quoi ils ne seront peut-être pas en mesure de contrer les répercussions négatives de leurs politiques et d'épauler les groupes traditionnellement marginalisés, ce qui risquerait d'exacerber les inégalités. Pour ce faire, ils devront travailler directement avec ces populations.

Il faudra également faire un meilleur suivi des progrès. La simple mesure des émissions ne suffit pas; il est aussi nécessaire d'évaluer tout un éventail d'indicateurs climatiques, économiques et sociaux, afin de s'assurer que les politiques climatiques encouragent une croissance économique inclusive, renforcent la résilience du Canada aux conséquences des changements climatiques et améliorent le bien-être de tous les citoyens (Arnold et coll., 2020).

Certaines portions de la transition seront hors du contrôle du pays (p. ex., politiques adoptées à l'étranger, demande mondiale décroissante de certains produits et services). Pour limiter autant que possible les risques et les répercussions associés, les gouvernements devront mettre en place des mesures de soutien appropriées. Le Canada demeurera cependant en plein contrôle de plusieurs autres facteurs centraux, notamment ses propres politiques, qu'il lui appartiendra d'employer non seulement pour réduire les émissions, mais aussi pour rétablir la justice sociale, économique et environnementale.

ANNEXES

Annexe 1 : Résumé des conclusions principales d'études similaires

ÉTUDE	TERRITOIRE VISÉ	CIBLE DE RÉDUCTION DES GES	MÉTHODOLOGIE	SCÉNARIOS	CONCLUSIONS PRINCIPALES
<i>Pathways to Deep Decarbonization in Canada</i> (Bataille et coll., 2015)	Canada	80 % par rapport aux niveaux de 2015 d'ici 2050	Cette étude emploie un modèle énergie-économie pour anticiper la demande de produits polluants, le bilan énergétique, le déploiement des technologies et les émissions. Ses projections du PIB, de l'emploi, de la structure économique et du commerce reposent sur un modèle informatique d'équilibre général macroéconomique ventilé par région et par secteur.	L'étude examine six trajectoires de décarbonisation : certaines accentuent les tendances actuelles (décarbonisation de la production d'électricité, efficacité énergétique, réduction des émissions dans les industries lourdes) tandis que d'autres privilégient des technologies transformatrices (CUSC, combustibles de remplacement) ou encouragent les activités économiques peu émettrices.	- Le Canada peut réaliser des réductions significatives en décarbonisant son réseau électrique, notamment en combinant une majorité de sources d'énergie renouvelable à des combustibles fossiles avec CUSC et en remplaçant la combustion par l'électricité dans de multiples secteurs. - La décarbonisation profonde requerra d'importants investissements et l'adoption de technologies de nouvelle génération. - Pour limiter les coûts au minimum, les gouvernements fédéral et provinciaux doivent agir sans tarder.
<i>Canada's Mid-Century Long-Term Low-Greenhouse Gas Development Strategy</i> (ECCC, 2016)	Canada	80 % par rapport aux niveaux de 2005 d'ici 2050	Ce rapport présente une revue de la littérature canadienne – <i>Trajectoires de décarbonisation profonde, Projet Trottier pour l'avenir énergétique, Agir sur les changements climatiques : les solutions d'universitaires canadiens et canadiennes</i> – ainsi que d'autres renseignements pertinents provenant d'études ou de rapports visant le Canada.	Le rapport examine les scénarios de modélisation de plusieurs études différentes et en compile les résultats pour déterminer les trajectoires de décarbonisation possibles.	- Pour bâtir une économie sobre en carbone, le Canada devra profondément transformer tous ses secteurs, surtout en ce qui a trait aux modèles de production et de consommation d'énergie, ainsi que consentir d'importants investissements dans la recherche, le développement et l'innovation. - La décarbonisation profonde dépendra grandement de la production d'électricité propre et de l'électrification de tous les secteurs de l'économie.

ÉTUDE	TERRITOIRE VISÉ	CIBLE DE RÉDUCTION DES GES	MÉTHODOLOGIE	SCÉNARIOS	CONCLUSIONS PRINCIPALES
<i>Défis et opportunités pour le Canada : transformations pour une réduction majeure des émissions de GES</i> (Projet Trottier pour l'avenir énergétique, 2016)	Canada	80 % par rapport aux niveaux de 1990 d'ici 2050	Cette étude utilise deux modèles – NATEM et CanESS – pour définir les scénarios et déterminer les trajectoires les plus rentables pour atteindre la cible de 2050. Les données des deux modèles sont ventilées par secteur économique et par province ou territoire. L'analyse se base aussi sur des consultations d'experts et une revue de la littérature.	L'étude emploie deux modèles complémentaires, considérés ensemble ou séparément, pour analyser 11 scénarios potentiels de réduction des émissions. L'objectif : déterminer comment la cible de 80 % peut être atteinte avec les technologies actuellement sur le marché et les améliorations et réductions des coûts anticipées par extrapolation.	• Pour opérer une réduction substantielle de ses émissions, le Canada devra limiter son utilisation des combustibles fossiles dans les emplois finaux, instaurer des mesures d'efficacité énergétique rentables dans tous les secteurs, décarboner son approvisionnement en électricité et augmenter son utilisation de la biomasse et des biocarburants. • Les combustibles fossiles seront toujours nécessaires en 2050, notamment le diesel pour le transport ferroviaire et de marchandises lourdes et le carburéacteur pour le transport aérien. Cette conclusion est largement attribuable aux difficultés d'approvisionnement en matières premières pour biocarburants, aux limites de l'électrification pour le transport ferroviaire et de marchandises lourdes et aux coûts marginaux élevés des autres sources d'énergie.
<i>United States Mid-Century Strategy for Deep Decarbonization</i> (gouvernement des États-Unis, 2016)	États-Unis	80 % par rapport aux niveaux de 2005 d'ici 2050	Ce rapport emploie diverses méthodes d'analyse, dont une revue de la littérature, la consultation d'experts et la modélisation. Il passe en revue les études précédentes sur la décarbonisation profonde des États-Unis, et intègre les commentaires des parties prenantes et des autres pays ayant un objectif similaire pour 2050. Il repose sur plusieurs outils de modélisation : Global Change Assessment Model, Global Timber Model, U.S. Forest Assessment Service Model et National Energy Modelling System.	Chaque scénario comprend une combinaison unique de technologies et de stratégies. Les deux premiers examinent la possibilité de produire diverses quantités d'émissions négatives d'ici 2050; les trois suivants explorent les systèmes sobres en carbone potentiels, selon différentes hypothèses; et le dernier étudie une option qui permettrait aux États-Unis de dépasser la barre des 80 % de réduction d'ici 2050.	• Il existe trois leviers indispensables à la décarbonisation profonde : 1) la transition vers un système énergétique sobre en carbone; 2) le captage de carbone avec des solutions naturelles et techniques; et 3) la réduction des émissions autres que le CO₂. • L'établissement de politiques internationales strictes sera essentiel à l'atteinte de la sobriété carbone mondiale.

ÉTUDE	TERRITOIRE VISÉ	CIBLE DE RÉDUCTION DES GES	MÉTHODOLOGIE	SCÉNARIOS	CONCLUSIONS PRINCIPALES
<i>Perspectives énergétiques canadiennes 2018 – Horizon 2050</i> (Langlois-Bertrand et coll., 2018)	Canada	30 % par rapport aux niveaux de 2005 d'ici 2030 et 80 % à 83 % d'ici 2050	Cette étude utilise le modèle NATEM pour examiner divers scénarios, qui diffèrent principalement sur le plan des réductions observées. Ces scénarios sont basés sur les cibles provinciales, fédérales et internationales. Ils sont modélisés selon les horizons 2030 et 2050, et les résultats sont ventilés par province. Les estimations de production et de consommation d'énergie au Canada pour les prochaines décennies sont tirées des scénarios de demande de l'Office national de l'énergie.	L'étude compare quatre scénarios de réduction des émissions, plus un scénario de maintien du statu quo : 1) un scénario respectant les cibles provinciales existantes (sans intervention du fédéral); 2) un scénario respectant les objectifs fédéraux pour 2030 et 2050, selon lequel 25 % des réductions proviennent de crédits carbone internationaux; 3) un scénario respectant les objectifs fédéraux, mais sans crédits carbone; et 4) un scénario de réductions plus importantes (83 % par rapport aux niveaux de 2005 d'ici 2050).	- La demande devrait beaucoup baisser dans le secteur pétrolier et gazier, et ce, dès 2030 (même dans le scénario de maintien du statu quo). - Dans tous les scénarios, même les plus stricts, on observe une certaine utilisation continue des combustibles fossiles. - On observe dans tous les scénarios une accélération de l'électrification du système énergétique canadien, principalement attribuable à l'énergie propre. - Le secteur de la transformation et du transport d'énergie sera déterminant pour la réduction des émissions.
<i>Trajectoires de réduction d'émissions de GES du Québec – Horizons 2030 et 2050</i> (ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2019)	Québec	37,5 % d'ici 2030 et 80 % à 95 % d'ici 2050	Cette étude utilise un modèle d'optimisation (NATEM-Canada) techno-économique couvrant en détail le système énergétique du Canada, les émissions de GES, les flux d'énergie interprovinciaux et internationaux, leur évolution à long terme et les technologies.	L'étude modélise quatre trajectoires potentielles avec des cibles différentes pour 2030 et 2050. Elle évalue les émissions, les systèmes énergétiques et les coûts associés à chacune dans huit scénarios reposant sur une réduction de la demande, une hausse de la biomasse, un remaniement du système alimentaire, l'avancée de diverses technologies et l'utilisation de CUSC.	- Le Québec n'a besoin, pour atteindre ses deux cibles de réduction (37,5 % d'ici 2030 et 75 % d'ici 2050), que des technologies sobres en carbone déjà sur le marché. - Pour réaliser des réductions de 85 % d'ici 2050, la province devra diminuer sa demande d'énergie. - Pour réaliser des réductions de 87,5 % d'ici 2050 sans crédits carbone internationaux, le Québec devra employer de nouvelles technologies (p. ex., BECSC) ou modifier ses habitudes, principalement pour faire baisser la demande d'énergie.

ÉTUDE	TERRITOIRE VISÉ	CIBLE DE RÉDUCTION DES GES	MÉTHODOLOGIE	SCÉNARIOS	CONCLUSIONS PRINCIPALES
<i>Pathways to 2050: Alternative Scenarios for Decarbonizing the U.S. Economy</i> (Lempert et coll., 2019)	États-Unis	80 % par rapport aux niveaux de 2005 d'ici 2050	Ce rapport est fondé sur une série d'ateliers au cours desquels un groupe de 20 sociétés a examiné divers scénarios pour atteindre les objectifs de décarbonisation de 2050. Ces ateliers ont servi à choisir l'outil de modélisation : le Global Change Assessment Model, un modèle planétaire multisectoriel évaluant les relations entre l'humain et la planète sur le long terme.	L'étude examine trois combinaisons uniques de politiques et de technologies : 1) un scénario <i>compétitif</i> , comprenant des mesures climatiques internationales robustes; 2) un scénario <i>fédéraliste</i> , selon lequel chaque État a ses propres politiques climatiques; et 3) un scénario de <i>consommation sobre en carbone</i> , dépendant des avancées technologiques, de la demande de produits à faibles émissions et de l'apparition de nouvelles entreprises et technologies.	- La décarbonisation profonde de l'économie américaine requerra la décarbonisation du secteur énergétique, le remplacement des combustibles utilisés dans le transport, les bâtiments et le secteur industriel; l'amélioration de l'efficacité énergétique des emplois finaux; l'utilisation de CUSC; et la réduction d'autres GES puissants (p. ex., le méthane). - Une décarbonisation appréciable requerra l'engagement d'actions sur tous les fronts et par toutes les parties, ainsi qu'un solide appui du public et une demande accrue de produits et de services sobres en carbone.
<i>Net Zero: The UK's Contribution to Stopping Global Warming</i> (Climate Change Committee, 2019)	Royaume-Uni	100 % d'ici 2050	Les résultats de cette étude proviennent de dix projets de recherche, de trois comités consultatifs et du travail du GIEC et d'autres chercheurs. Ils s'inspirent aussi de modèles climatiques (p. ex., modèles d'évaluation intégrée) schématisant les interactions entre l'écosystème énergétique mondial, l'agriculture, l'utilisation des terres et les systèmes climatiques.	Les scénarios examinés se divisent en trois catégories. Les premiers prennent appui sur un ensemble de mesures tirant parti des politiques existantes pour atteindre la carboneutralité à moindre coût. Les seconds supposent une économie basée sur l'hydrogène sobre en carbone et l'emploi généralisé de CUSC et de mesures de gestion des terres. La dernière catégorie regroupe les autres possibilités, comme l'évolution de la demande et les grandes avancées technologiques.	- Il est possible d'atteindre la carboneutralité d'ici 2050 avec les technologies existantes. - Le CUSC et la BECSC joueront des rôles importants dans l'atteinte de la carboneutralité d'ici 2050. - Un cinquième des terres agricoles du Royaume-Uni devra être converti à diverses utilisations de captage des émissions (boisement, production de biomasse, restauration des tourbières). - Les politiques actuelles sont insuffisantes pour atteindre la carboneutralité; le pays doit établir des politiques claires, stables et réfléchies dans tous les secteurs économiques.

ÉTUDE	TERRITOIRE VISÉ	ÇIBLE DE RÉDUCTION DES GES	MÉTHODOLOGIE	SCÉNARIOS	CONCLUSIONS PRINCIPALES
<i>Towards Net-Zero Emissions in the EU Energy System by 2050</i> (Tsiropoulos et coll., 2020)	Union européenne	50 % d'ici 2030 et 100 % d'ici 2050	Ce rapport compile et analyse les résultats des différents modèles et scénarios publiés entre 2017 et 2019 (Global Energy Perspective, CTI-EU, PRIMES, ETP-TIMES, World Energy Model).	Le rapport étudie 8 scénarios permettant de réaliser des réductions de 50 % par rapport aux niveaux de 1990 d'ici 2030 ainsi que 16 trajectoires menant vers la carboneutralité d'ici 2050.	• Tous les scénarios éliminent presque complètement le charbon et réduisent l'utilisation du pétrole et des gaz naturels de 75 %. • En 2050, l'énergie renouvelable représentera de 70 % à 100 % de l'alimentation en électricité. Les biocarburants passeront de 9 % à 20 % du total de l'énergie consommée et seront principalement utilisés dans l'aviation et le transport de marchandises. • Des solutions à émissions négatives naturelles et techniques devront être employées pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050. • De 65 % à 90 % du parc automobile sera composé de véhicules électriques, majoritairement à batterie.
<i>Une économie mondiale zéro-carbone? Mission réalisable</i> (Energy Transitions Commission, 2020)	Planète	100 % d'ici 2050 dans les pays développés 100 % d'ici 2060 dans les pays en voie de développement	Ce rapport réunit et développe les conclusions des publications précédentes de l'Energy Transitions Commission (ETC), rédigées avec l'aide d'experts des secteurs industriel et universitaire et de diverses organisations non gouvernementales. Il s'inspire d'analyses réalisées par d'autres organisations ainsi que d'une revue plus générale de la littérature.	Le rapport compare plusieurs scénarios, notamment les scénarios carboneutres de l'ETC et divers autres scénarios de décarbonisation profonde, dont ceux de l'Agence internationale de l'énergie.	• D'un point de vue technique et économique, il est possible d'atteindre la carboneutralité d'ici le milieu du siècle sans pérenniser ni généraliser les solutions à émissions négatives naturelles ou techniques. • Les coûts associés à l'atteinte de la carboneutralité d'ici 2050 sont très faibles, surtout par rapport aux coûts de l'inactivité face aux changements climatiques. De plus, la transition aurait des bienfaits considérables et améliorerait le bien-être général. • Pour atteindre la carboneutralité, il faudra profondément réformer le système énergétique. Les combustibles fossiles devront être largement remplacés par l'électricité propre, combinée à l'hydrogène, la biomasse durable et un emploi restreint de combustibles fossiles avec CUSC. Il faudra aussi améliorer considérablement la productivité énergétique.

Annexe 2 : Détails des scénarios modélisés

Pour en savoir plus sur les hypothèses, les paramètres, les sources et les scénarios de la modélisation, voir Navius Research, 2021.

ASSUMPTION	DESCRIPTION
Coût des véhicules électriques	
Coût de référence	Le coût de référence d'une batterie de véhicule électrique diminue avec le temps, suivant une baisse du coût d'immobilisation et des coûts intangibles. La projection pour 2030 s'élève à 23 700 \$ par batterie (25 100 \$ avec le chargeur).
Coût faible	Advenant une adoption mondiale plus rapide des véhicules électriques et des batteries et un plus grand apprentissage par la pratique, le coût des batteries (y compris le coût d'immobilisation et les coûts intangibles) pourrait diminuer davantage, atteignant 22 120 \$ par batterie d'ici 2030 (23 540 \$ avec le chargeur).
Coût de l'hydrogène et taux possible	
Chiffres de référence	Les considérations opérationnelles et de sécurité limitent l'ajout d'hydrogène dans les pipelines de gaz naturel. Certaines des infrastructures actuelles ne pouvant supporter un taux de plus de 2 % (en volume), nous avons utilisé ce chiffre comme taux de référence. Le coût de référence de départ pour la production d'hydrogène se situe entre 4,90 \$/kg, ou 34,70 \$/GJPCS*, et 9,50 \$/kg ou 68,30 \$/GJPCS, selon la technologie employée. Le coût de référence des véhicules à pile à hydrogène diminue avec le temps, suivant une baisse du coût d'immobilisation et des coûts intangibles; le modèle prévoit une réduction selon le taux d'adoption, avec un minimum potentiel de 32 810 \$, mais le plancher de 2050 est fixé à 51 500 \$ pour cette analyse.
Coût faible, taux élevé	Le réseau pipelinier de gaz naturel pourrait être modifié de sorte à supporter un taux d'hydrogène de 20 % (en volume), chiffre que nous avons utilisé comme plafond pour cette analyse. Le coût faible projeté serait de 10 % à 20 % inférieur au coût de référence, selon la technologie de production employée, en supposant un plus grand apprentissage par la pratique sur le marché international. Le coût faible des véhicules à pile à hydrogène (y compris le coût d'immobilisation et les coûts intangibles) pourrait atteindre un minimum de 23 825 \$, mais le plancher de 2050 est fixé à 42 950 \$ pour cette analyse.
Coût de la production d'électricité propre de sources stables	
Coût de référence	Le coût de référence pour une hausse de la capacité de production d'électricité propre de sources stables s'élève à 152 \$/MWh.
Coût élevé	Ce scénario suppose des coûts prohibitifs ou d'autres obstacles au développement qui empêcheraient le Canada d'améliorer sa capacité de production d'électricité propre de sources stables.
Stratégies climatiques des autres grands pays	
Retard des autres grands pays sur le Canada	Dans ce scénario, la lutte internationale contre les changements climatiques est insuffisante. Les États-Unis continuent de suivre leur trajectoire de référence, sans instaurer de nouvelles politiques climatiques, et les autres grands pays prennent du retard sur le Canada. On observe donc une réduction plus lente du coût des technologies propres comme les véhicules électriques, l'hydrogène et l'énergie renouvelable, en raison d'un faible taux d'adoption à l'étranger.
Progression égale du Canada et des autres grands pays	Pour modéliser une progression mondiale égale, nous avons d'abord plafonné les émissions des États-Unis de sorte à simuler de nouvelles politiques climatiques. Ce scénario entraîne une réduction accélérée du coût des technologies propres, proportionnelle à l'adoption accrue aux États-Unis. Pour modéliser la progression des autres grands pays, nous avons augmenté les prix internationaux des marchandises de sorte à simuler le commerce et les interactions politiques. Cette augmentation correspond aux coûts plus élevés d'une production carboneutre en Amérique du Nord. L'hypothèse ici est que la hausse des coûts de production serait similaire dans tous les grands pays instaurant des politiques climatiques, ce qui ferait mondialement grimper les prix des biens et des services hautement émetteurs par rapport à ceux qui sont plus sobres en carbone, favorisant ainsi l'adoption de ces derniers et, en retour, une baisse des coûts.

ASSUMPTION	DESCRIPTION
Disponibilité des solutions techniques à émissions négatives et des formes avancées de CUSC	
Disponibilité élevée	Supposant la disponibilité de solutions de captation atmosphérique directe (CAD), de captage, utilisation et stockage du carbone (CUSC) et de bioénergie avec captage et stockage du carbone (BECSC), le coût de la CAD s'élève initialement à 368 \$/tonne d'éq. CO ₂ et diminue à mesure que s'accumule l'expérience de ces technologies, atteignant un plancher de 125 \$/tonne d'éq. CO ₂ en 2050. Le coût du CUSC varie selon les emplois finaux, oscillant entre 20 \$ et 120 \$/tonne d'éq. CO ₂ pour les technologies sans combustion et entre 50 \$ et 150 \$/tonne d'éq. CO ₂ pour les autres. Il diffère aussi d'une région à l'autre, en raison des coûts associés au transport et au stockage du CO ₂ , qui vont de 3,60 \$/tonne d'éq. CO ₂ en Alberta à 17,90 \$/tonne d'éq. CO ₂ en Colombie-Britannique.
Disponibilité faible	Ce scénario suppose que la CAD et le CUSC des émissions dues à la combustion (flux non concentrés) ne sont pas applicables à grande échelle ou requièrent des investissements prohibitifs. Le CUSC demeure possible dans une certaine mesure pour les émissions concentrées sans combustion, par exemple les émissions des procédés associés à la production d'hydrogène, de ciment et d'engrais. Le coût de la captation des émissions sans combustion varie entre 20 \$ et 120 \$/tonne d'éq. CO ₂ , selon les emplois finaux, plus des coûts de transport et de stockage allant de 3,60 \$/tonne d'éq. CO ₂ en Alberta à 17,90 \$/tonne d'éq. CO ₂ en Colombie-Britannique.
Disponibilité moyenne	Ce scénario suppose que la CAD n'est pas viable sur le plan technique ou que son coût serait prohibitif. Le CUSC demeure possible pour les émissions dues à la combustion (flux non concentrés) et les émissions des procédés (flux concentrés). Son coût varie selon les emplois finaux, oscillant entre 20 \$ et 120 \$/tonne d'éq. CO ₂ pour les émissions sans combustion et entre 50 \$ et 150 \$/tonne d'éq. CO ₂ pour les autres. Il diffère aussi d'une région à l'autre, en raison des coûts associés au transport et au stockage du CO ₂ , qui vont de 3,60 \$/tonne d'éq. CO ₂ en Alberta à 17,90 \$/tonne d'éq. CO ₂ en Colombie-Britannique.
Prix international du pétrole	
Prix élevé	63 \$/baril d'ici 2030 et 87 \$/baril d'ici 2050 (dollars américains de 2020).
Prix faible	38 \$/baril d'ici 2030 et 36 \$/baril d'ici 2050 (dollars américains de 2020).
Mesures de protection de la concurrence	
Avec	Il existe des mesures pour prévenir les fuites de carbone dans les secteurs hautement émetteurs dépendants du commerce international, maintenir leur compétitivité et encourager les émetteurs industriels à réduire leurs émissions.
Sans	Aucune mesure n'est en vigueur.
Disponibilité des biocarburants de deuxième génération	
Oui	Les biocarburants fabriqués à partir de matières premières de deuxième génération sont viables sur le plan technique. Le coût pré-transport s'élève à 81 \$/t.a. pour les déchets agricoles et à 94 \$/t.a. pour les déchets forestiers. La disponibilité et le coût de ces deux types de matières premières sont généralisés à toutes les matières premières de deuxième génération qui ne sont pas directement modélisées (p. ex., panic érigé).
Non	Les biocarburants fabriqués à partir de matières premières de deuxième génération ne sont pas viables sur le plan technique.
Amélioration de l'intensité des émissions associées à la production de pétrole extrait de sables bitumineux	
Chiffres de référence	Les chiffres de référence pour l'amélioration de l'intensité des émissions s'élèvent à 0,03 tonne d'éq. CO ₂ /baril pour l'exploitation et à 0,07 tonne d'éq. CO ₂ /baril pour la production in situ d'ici 2030, et à 0,02 tonne/baril et 0,05 tonne/baril respectivement d'ici 2050.
Réduction accélérée	Si l'on suppose une amélioration plus importante, les totaux d'émissions associées à la production de pétrole extrait de sables bitumineux sont inférieurs de 20 % à ceux du scénario de référence pour 2030, et de 30 % pour 2050 (chiffres tirés des projections de l'Association canadienne des producteurs pétroliers).

Note : Tous les montants sont en dollars canadiens de 2020, sauf mention contraire. * Pouvoir calorifique supérieur ** Tonne anhydre

HYPOTHÈSES

NO DE SCÉNARIO	Coût des véhicules électriques		Coût de l'hydrogène et taux possible		Coût de la production d'électricité propre de sources stables		Stratégies climatiques des autres grands pays		Disponibilité des solutions techniques à émissions négatives et des formes avancées de CUSC			Prix international du pétrole		Mesures de protection de la concurrence		Disponibilité des biocarburants de deuxième génération		Amélioration des émissions associées à la production de sables bitumineux	
	Coût de référence	Coût faible	Chiffres de référence	Coût faible, taux élevé	Coût de référence	Coût élevé	Retard des autres grands pays sur le Canada	Progression égale du Canada et des autres grands pays	Disponibilité élevée	Disponibilité faible	Disponibilité moyenne	Prix élevé	Prix faible	Avec	Sans	Oui	Non	Chiffres de référence	Réduction accélérée
1	✓		✓			✓	✓		✓			✓			✓	✓		✓	
2	✓		✓			✓	✓			✓		✓			✓	✓		✓	
3	✓		✓			✓		✓	✓			✓			✓	✓		✓	
4	✓		✓			✓		✓		✓			✓		✓	✓		✓	
5	✓		✓		✓		✓			✓		✓			✓	✓		✓	
6	✓		✓		✓			✓		✓			✓		✓	✓		✓	
7		✓	✓			✓	✓		✓			✓			✓	✓		✓	
8		✓	✓			✓	✓			✓		✓			✓	✓		✓	
9		✓	✓			✓		✓	✓			✓			✓	✓		✓	
10		✓	✓			✓		✓		✓			✓		✓	✓		✓	
11		✓	✓		✓		✓			✓		✓			✓	✓		✓	
12		✓	✓		✓			✓		✓			✓		✓	✓		✓	
13		✓		✓		✓	✓		✓			✓			✓	✓		✓	
14		✓		✓	✓		✓			✓		✓			✓	✓		✓	
15		✓		✓		✓		✓	✓			✓			✓	✓		✓	
16		✓		✓	✓			✓		✓			✓		✓	✓		✓	
17	✓		✓			✓	✓		✓			✓		✓		✓		✓	
18	✓		✓			✓	✓			✓		✓		✓		✓		✓	
19	✓		✓			✓		✓	✓			✓		✓		✓		✓	
20	✓		✓			✓		✓		✓		✓		✓		✓		✓	
21	✓		✓		✓		✓			✓		✓		✓		✓		✓	

HYPOTHÈSES

NO DE SCÉNARIO	Coût des véhicules électriques		Coût de l'hydrogène et taux possible		Coût de la production d'électricité propre de sources stables		Stratégies climatiques des autres grands pays		Disponibilité des solutions techniques à émissions négatives et des formes avancées de CUSC			Prix international du pétrole		Mesures de protection de la concurrence		Disponibilité des biocarburants de deuxième génération		Amélioration des émissions associées à la production de sables bitumineux	
	Coût de référence	Coût faible	Chiffres de référence	Coût faible, taux élevé	Coût de référence	Coût élevé	Retard des autres grands pays sur le Canada	Progression égale du Canada et des autres grands pays	Disponibilité élevée	Disponibilité faible	Disponibilité moyenne	Prix élevé	Prix faible	Avec	Sans	Oui	Non	Chiffres de référence	Réduction accélérée
22	✓		✓		✓			✓		✓			✓	✓		✓		✓	
23		✓	✓			✓	✓		✓			✓		✓		✓		✓	
24		✓	✓			✓	✓			✓		✓		✓		✓		✓	
25		✓		✓		✓	✓		✓			✓		✓		✓		✓	
26		✓	✓			✓		✓	✓			✓		✓		✓		✓	
27		✓	✓			✓		✓		✓			✓	✓		✓		✓	
28		✓		✓		✓		✓	✓			✓		✓		✓		✓	
29		✓	✓		✓		✓			✓		✓		✓		✓		✓	
30		✓		✓	✓		✓			✓		✓		✓		✓		✓	
31		✓	✓		✓			✓		✓			✓	✓		✓		✓	
32		✓		✓	✓			✓		✓			✓	✓		✓		✓	
33	✓		✓			✓	✓				✓	✓			✓	✓		✓	
34		✓	✓			✓	✓				✓	✓			✓	✓		✓	
35	✓		✓		✓		✓				✓	✓			✓	✓		✓	
36		✓	✓		✓		✓				✓	✓			✓	✓		✓	
37		✓		✓	✓		✓				✓	✓			✓	✓		✓	
38	✓		✓			✓	✓				✓	✓		✓		✓		✓	
39		✓	✓			✓	✓				✓	✓		✓		✓		✓	
40	✓		✓		✓		✓				✓	✓		✓		✓		✓	
41		✓	✓		✓		✓				✓	✓		✓		✓		✓	
42		✓		✓	✓		✓				✓	✓		✓		✓		✓	

HYPOTHÈSES

NO DE SCÉNARIO	Coût des véhicules électriques		Coût de l'hydrogène et taux possible		Coût de la production d'électricité propre de sources stables		Stratégies climatiques des autres grands pays		Disponibilité des solutions techniques à émissions négatives et des formes avancées de CUSC			Prix international du pétrole		Mesures de protection de la concurrence		Disponibilité des biocarburants de deuxième génération		Amélioration des émissions associées à la production de sables bitumineux	
	Coût de référence	Coût faible	Chiffres de référence	Coût faible, taux élevé	Coût de référence	Coût élevé	Retard des autres grands pays sur le Canada	Progression égale du Canada et des autres grands pays	Disponibilité élevée	Disponibilité faible	Disponibilité moyenne	Prix élevé	Prix faible	Avec	Sans	Oui	Non	Chiffres de référence	Réduction accélérée
43	✓		✓			✓		✓			✓		✓		✓	✓		✓	
44		✓	✓			✓		✓			✓		✓		✓	✓		✓	
45	✓		✓		✓			✓			✓		✓		✓	✓		✓	
46		✓	✓		✓			✓			✓		✓		✓	✓		✓	
47		✓		✓	✓			✓			✓		✓		✓	✓		✓	
48	✓		✓			✓		✓			✓		✓	✓		✓		✓	
49		✓	✓			✓		✓			✓		✓	✓		✓		✓	
50	✓		✓		✓			✓			✓		✓	✓		✓		✓	
51		✓	✓		✓			✓			✓		✓	✓		✓		✓	
52		✓		✓	✓			✓			✓		✓	✓		✓		✓	
53	✓		✓		✓		✓			✓		✓		✓		✓			✓
54		✓	✓		✓		✓			✓		✓		✓		✓			✓
55		✓		✓	✓		✓			✓		✓		✓		✓			✓
56	✓		✓		✓			✓		✓			✓	✓		✓			✓
57		✓		✓	✓			✓		✓			✓	✓		✓			✓
58	✓		✓		✓			✓		✓		✓		✓		✓		✓	
59		✓		✓	✓			✓		✓		✓		✓		✓		✓	
60		✓		✓	✓		✓			✓		✓		✓			✓	✓	
61	✓		✓		✓		✓			✓		✓		✓			✓	✓	
62		✓	✓		✓		✓			✓		✓		✓			✓	✓	

Annexe 3 : Émissions de gaz à effet de serre dans les différents secteurs de l'économie canadienne, années sélectionnées (Mt d'éq. CO₂)

SECTEUR ÉCONOMIQUE	1990	2005	2018*
MT D'ÉQ. CO ₂			
Total national de GES	603	730	729
Pétrole et gaz	106	158	193
Traitement en amont du pétrole et du gaz	86	134	173
<i>Production et traitement du gaz naturel</i>	36	55	50
<i>Production de pétrole classique</i>	23	30	29
<i>Sables bitumineux</i>	15	37	84
<i>Transport du pétrole, du gaz naturel et du CO₂</i>	12	12	11
Traitement en aval du pétrole et du gaz	20	23	21
<i>Raffinage du pétrole</i>	18	22	19
<i>Distribution du gaz naturel</i>	2	1	1
Électricité	95	119	64
Transport	121	161	186
Transport des personnes	71	90	99
Transport des marchandises	31	60	78
Autres	19	10	9
Industrie lourde	97	87	78
Exploitation minière	7	7	8
Fusion et raffinage	17	14	10
Pâtes et papiers	15	9	8
Fer et acier	16	16	16
Ciment	10	13	11
Chaux et gypse	3	3	2
Produits chimiques et engrais	29	25	24
Immobilier	74	86	92
Services	28	40	46
Résidentiel	47	46	47
Agriculture	57	72	73
Utilisation de combustibles dans l'exploitation agricole	11	12	14
Cultures	15	16	24
Bétail	32	44	36
Déchets	21	20	18
Production de charbon	4	2	3
Industrie légère	21	17	14
Construction	6	6	6
Ressources forestières	1	1	1

Source : ECCC (2020b).

Note : Si les totaux ne sont pas exacts, c'est que les chiffres ont été arrondis.

* Année la plus récente pour laquelle nous avons des données.

Annex 4: GHG reduction pathways in different economic sectors

Figure 21 : Bâtiments

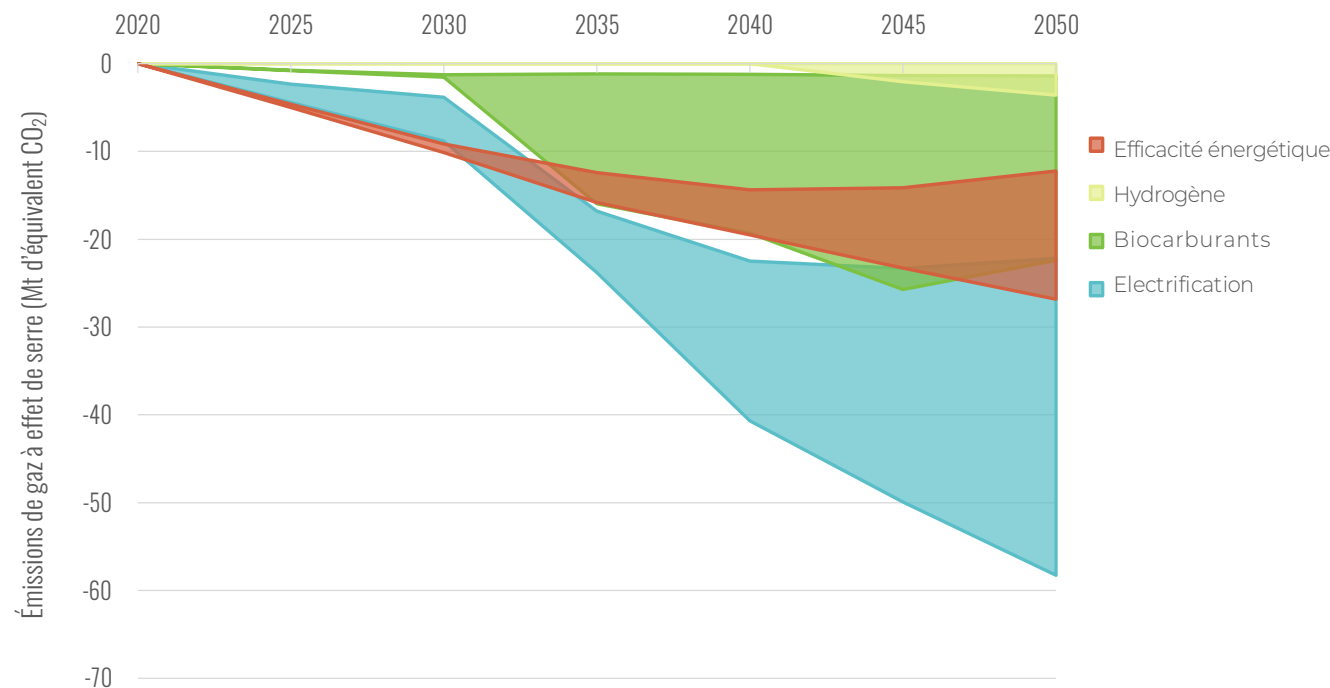


Figure 22 : Transport personnel

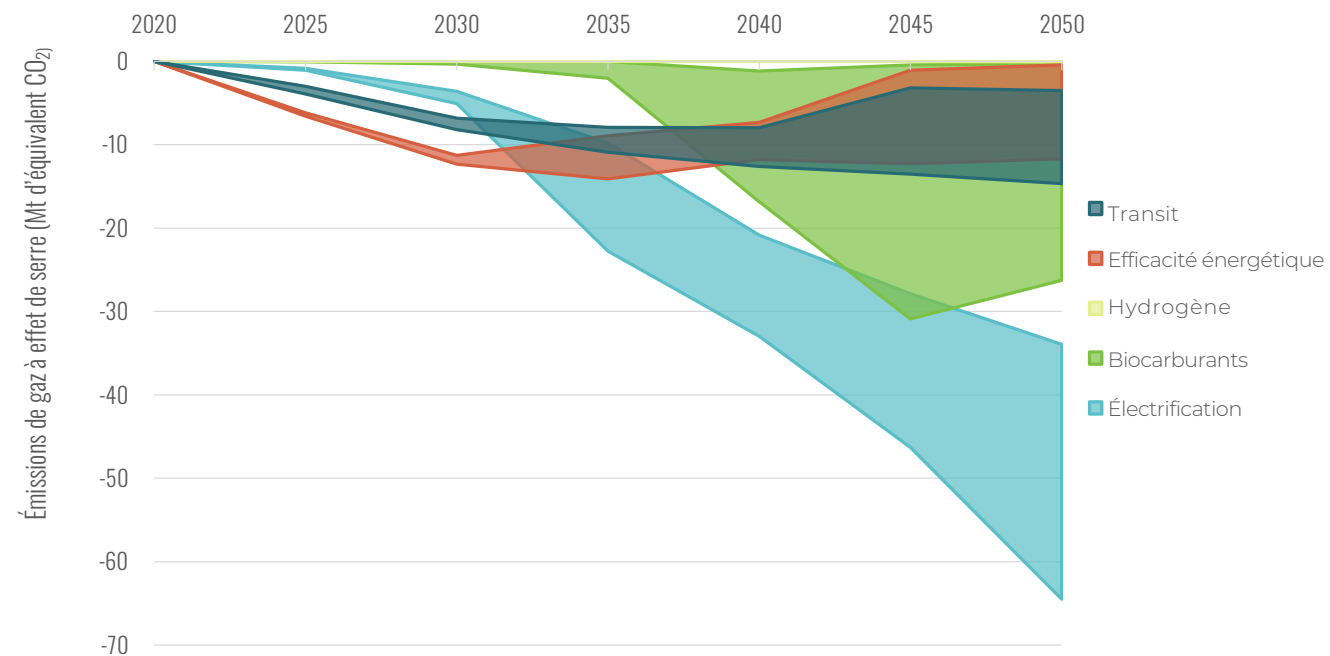


Figure 23 : Transport moyen et lourd

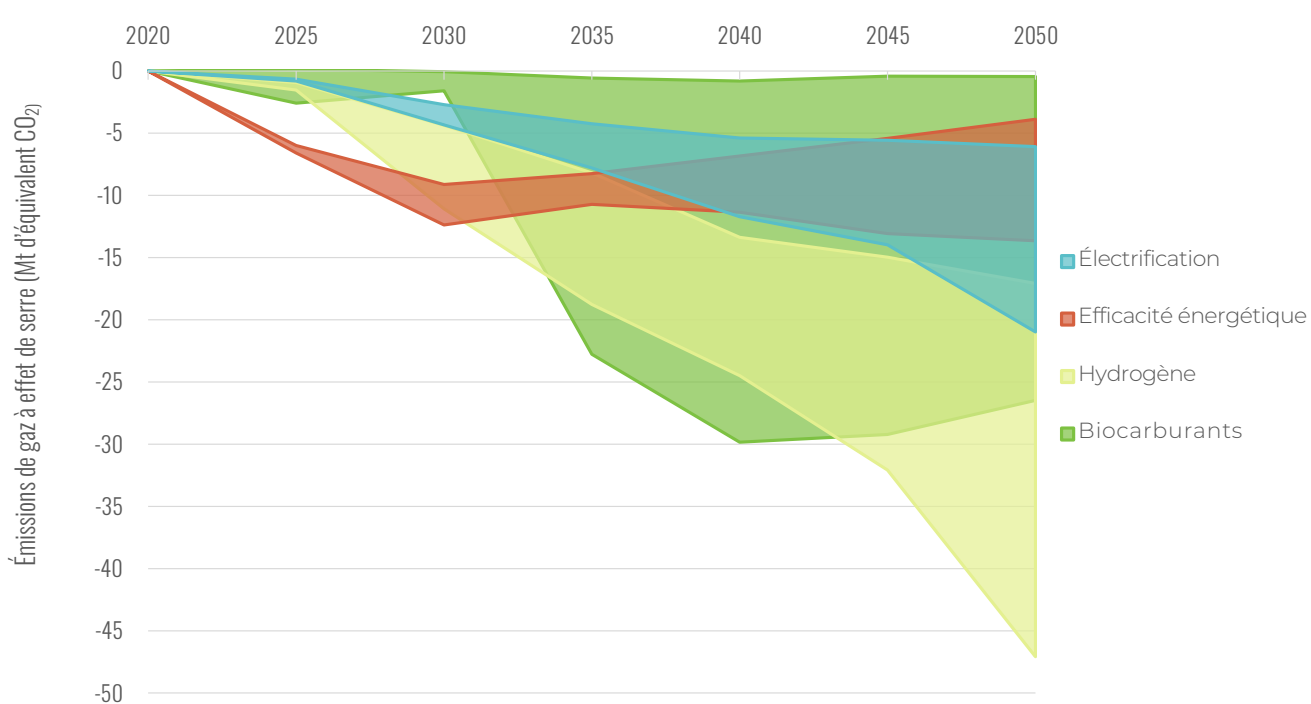


Figure 24 : Industrie

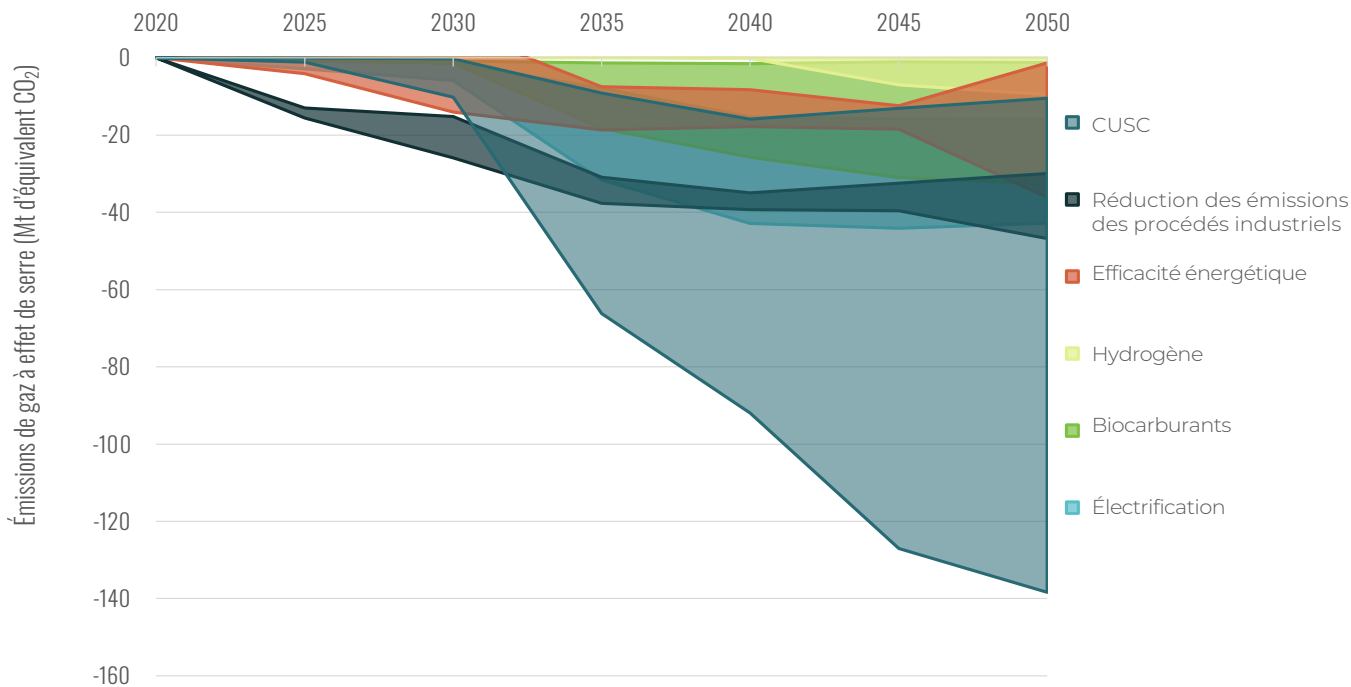
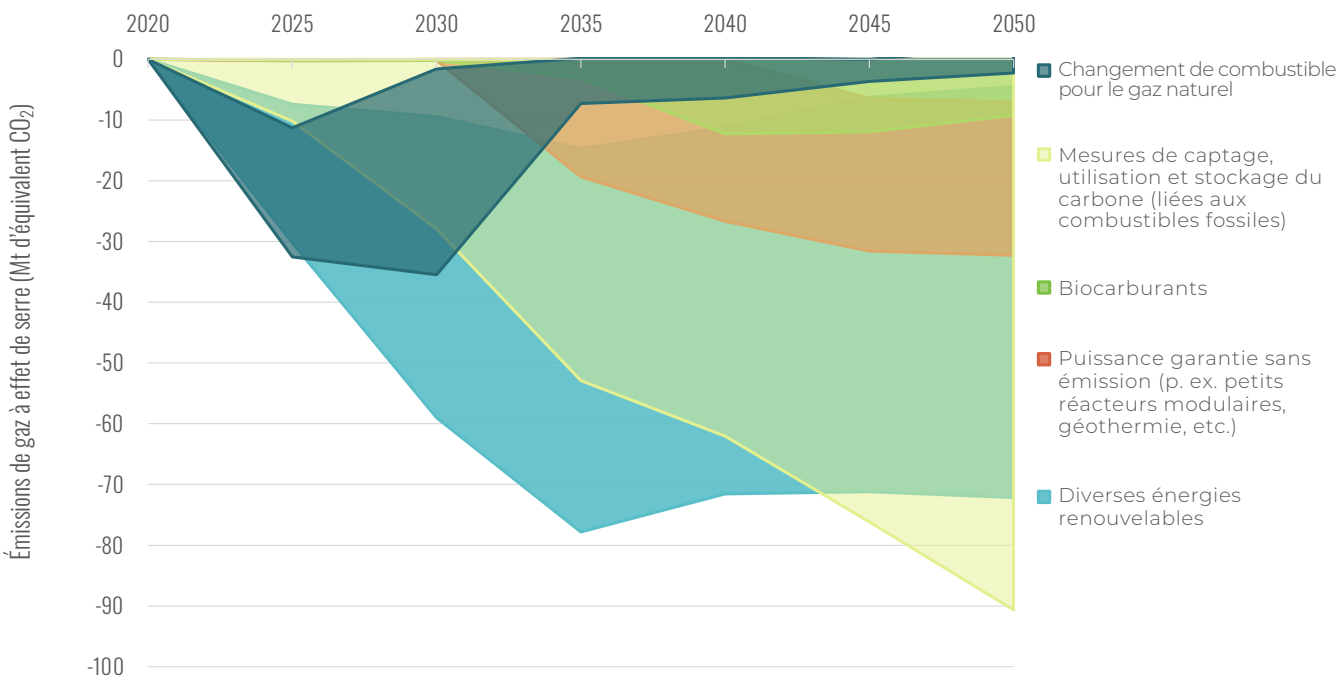


Figure 25: Génération d'électricité

Figure 25



RÉFÉRENCES

- AIE (Agence internationale de l'énergie) (2011). Technology Roadmap: Smart Grids : <https://www.iea.org/reports/technology-road-map-smart-grids>.
- AIE (Agence internationale de l'énergie) (2019a). Heat Pumps : <https://www.iea.org/reports/heat-pumps>.
- AIE (Agence internationale de l'énergie) (2019b). Innovation Gaps : <https://www.iea.org/reports/innovation-gaps>.
- AIE (Agence internationale de l'énergie) (2020a). Energy Technology Perspectives, rapports de l'AIE, Paris : <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>.
- AIE (Agence internationale de l'énergie) (2020b). ETP Clean Energy Technology Guide : <https://www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide>.
- AIE (Agence internationale de l'énergie) (2020c). Aviation, rapports de l'AIE, Paris : <https://www.iea.org/reports/aviation>.
- AIE (Agence internationale de l'énergie) (2020d). Global EV Outlook 2020, rapports de l'AIE, Paris : <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>.
- Alberta Carbon Capture and Storage Development Council (2009). Accelerating Carbon Capture and Storage Implementation in Alberta: Final Report : https://keith.seas.harvard.edu/files/tkg/files/accelerating_carbon_capture_and_storage_implementation.pdf.
- Allen-Dumas, M., K. C. Binita et C. Cunliff (2019). Extreme Weather and Climate Vulnerabilities of the Electric Grid: A Summary of Environmental Sensitivity Quantification Methods, Climate Change Science Institute, Oak Ridge National Laboratory : <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/09/f67/Oak%20Ridge%20National%20Laboratory%20EIS%20Response.pdf>.
- Ambrose, Jillian (2020). « Scottish homes to be first in world to use 100% green hydrogen », The Guardian, 30 novembre 2020 : <https://www.theguardian.com/environment/2020/nov/30/scottish-green-hydrogen-fife>.
- Arnold, J., R. Samson, W. Ahmed, D. Beugin et J. Bourque (2020). 11 façons de mesurer la croissance propre, Institut canadien pour des choix climatiques : https://choixclimatiques.ca/wp-content/uploads/2020/10/11-FACONS-DE-MESURER-LA-CROISSANCE-PROPRE_rapport_01.pdf.
- Axsen, J. et M. Wolinetz (2019). Shifting Gears: Climate Solutions for Transportation in Cities, Metro Vancouver Case Study, Fondation David Suzuki : <https://davidsozuzki.org/science-learning-centre-article/shifting-gears-climate-solutions-for-transportation-in-cities-metro-vancouver-case-study/>.
- Bataille, C. (2020). « Physical and policy pathways to net-zero emissions industry », WIREs Climate Change, vol. 11, n° 2, e633 : <https://doi.org/10.1002/wcc.633>.
- Bataille, C., D. Sawyer et N. Melton (2015). Pathways to deep decarbonization in Canada, Sustainable Development Solutions Network : <https://cmcghg.com/wp-content/uploads/2015/07/Final-Canada-DDPP-Country-Report-July-14.pdf>.
- Beugin, D., J. Dion, A. Kanduth, C. Lee, D. Sawyer et J. Arnold (2020). Baliser le chemin : Légiférer nos objectifs climatiques en route vers 2050, Institut canadien pour des choix climatiques : <https://choixclimatiques.ca/reports/baliser-le-chemin/>.
- Bigg, Martin (2018). Despite Cars Becoming More Powerful, Fuel Economy Is Improving, CarBuzz, 23 juin 2018 : <https://carbuzz.com/news/despite-cars-becoming-more-powerful-fuel-economy-is-improving>.
- Billimoria, S., L. Guccione, M. Henchen et L. Louis-Prescott (2018). The Economics of Electrifying Buildings, Rocky Mountain Institute : <https://rmi.org/insight/the-economics-of-electrifying-buildings>.
- BloombergNEF. 2020. "Hydrogen Economy Outlook 2020" <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>
- Bows-Larkin, Alice (2015). « All adrift: aviation, shipping, and climate change policy », Climate Policy, vol. 15, n° 6, p. 681-702.
- Bureau du gouverneur Gavin Newsom (2020). Governor Newsom Announces California Will Phase Out Gasoline-Powered Cars and Drastically Reduce Demand for Fossil Fuel in California's Fight Against Climate Change, 23 septembre 2020 : <https://www.gov.ca.gov/2020/09/23/governor-newsom-announces-california-will-phase-out-gasoline-powered-cars-drastically-reduce-demand-for-fossil-fuel-in-californias-fight-against-climate-change/>.
- Canadian Utilities Limited (2020). ATCO to build Alberta's first hydrogen blending project with ERA support, 21 juillet 2020 : <https://www.atco.com/en-ca/about-us/news/2020/122900-atco-to-build-alberta-s-first-hydrogen-blending-project-with-era.html>.
- Carton, W., A. Asiyani, S. Beck, H. J. Buck et J. F. Lund (2020). « Negative emissions and the long history of carbon removal », Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change (août), e67.
- Catlin, J. R. et Y. Wang (2013). « Recycling gone bad: When the option to recycle increases resource consumption », Journal of Consumer Psychology, vol. 23, n° 1, p. 122-127.

CBC (2017). Paris to ban all gas-powered cars by 2030, 12 octobre 2017 : <https://www.cbc.ca/news/business/paris-gasoline-car-ban-1.4351377>.

CGTN (2020). China calls for global green revolution in the post-COVID era, 24 septembre 2020. <https://news.cgtn.com/news/2020-09-22/Xi-Jinping-China-aims-to-achieve-carbon-neutrality-by-2060-TZX22EfJiE/index.html>.

Climate Change Committee (2019). Net Zero: The UK's contribution to stopping global warming. Londres, Royaume-Uni : <https://www.theccc.org.uk/publication/net-zero-the-uks-contribution-to-stopping-global-warming/>.

Conseil du bâtiment durable du Canada (2019). Arguments en faveur des bâtiments à carbone zéro : https://www.cagbc.org/cagbcdocs/advocacy/CBDCa_Arguments_en_faveur_du_b%C3%A2timent_%C3%A0_carbone_z%C3%A9ro_%282019%29_FR.pdf.

Conseil de l'Arctique (2020). The Old Crow Solar Project, 14 Décembre 2020 : <https://arctic-council.org/en/news/the-old-crow-solar-project/>.

Conseil national de recherches du Canada (2017). Review of hydrogen tolerance of key Power-to-Gas (P2G) components and systems in Canada, gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario) : <https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/td/?id=94a036f4-0e60-4433-add5-9479350f74de>.

Conseil national de recherches du Canada (2019). Marché des protéines d'origine végétale : analyse du marché canadien et du marché mondial, gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario) : <https://nrc.canada.ca/fr/recherche-developpement/recherche-collaboration/programmes/marche-proteines-dorigine-vegetale-analyse-marche-canadien-marche-mondial>.

Coulombel, N., V. Boutueil, L. Liu, V. Vigié et B. Yin (2019). « Substantial rebound effects in urban ridesharing: Simulating travel decisions in Paris, France », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 71, p. 110-126.

Cox, E., E. Spence et N. Pidgeon (2020). « Public perceptions of carbon dioxide removal in the United States and the United Kingdom », *Nature Climate Change*, vol. 10, p. 744-749.

Crider, J. (2020). TransAlta Uses Tesla megapacks to Power WindCharger, *CleanTechnica*, 22 octobre 2020 : <https://cleantechnica.com/2020/10/22/transalta-uses-tesla-megapacks-to-power-windcharger/>.

Davis, S.J., N.S. Lewis, M. Shaner, S. Aggarwal, D. Arent, I.L. Azevedo, S.M. Benson, T. Bradley, J. Brouwer, Y.-M. Chiang, C.T.M. Clack, A. Cohen, S. Doig, J. Edmonds, P. Fennell, C.B. Field, B. Hannegan, B.M. Hodge, M.I. Hoffert, E. Ingersoll, P. Jaramillo, K.S. Lackner, K.J. Mach, M. Mastrandrea, J. Ogden, P.F. Peterson, D.L. Sanchez, D. Sperling, J. Stagner, J.E. Trancik, C.-J. Yang et K. Caldeira (2018). « Net-zero emissions energy systems », *Science*, vol. 360, n° 6396 (juin) : <https://science.sciencemag.org/content/360/6396/eaas9793>.

Delucchi, Mark (2006). Lifecycle Analyses of Biofuels, Institute of Transportation Studies, Université de la Californie, Davis : <https://escholarship.org/uc/item/1pq0f84z>.

Devlin, A., L. Frank et J. VanLoon (2009). Physical activity and transportation benefits of walkable approaches to community design in British Columbia, British Columbia Recreation and Parks Association : http://atl.sites.olt.ubc.ca/files/2011/07/BCRPA_Transportation_Study_2009.pdf.

Dowling, J. A., K. Z. Rinaldo, T. H. Ruggles, S.J. David, M. Yuan, F. Tong, N. S. Lewis et K. Caldeira (2020). « Role of Long-Duration Energy Storage in Variable Renewable Electricity Systems », *Joule*, vol. 4, n° 9, p. 1907-1928 : <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.07.007>.

ECCC (Environnement et Changement climatique Canada) (2016). Stratégie canadienne de développement à faible émission de gaz à effet de serre à long terme pour le milieu du siècle, gouvernement du Canada, Gatineau (Québec) : <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Strat%C3%A9gie%20canadienne%20pour%20le%20milieu%20du%20si%C3%A8cle.pdf>.

ECCC (Environnement et Changement climatique Canada) (2019a). Le gouvernement du Canada publie des projections d'émissions qui montrent une progression vers la cible climatique, gouvernement du Canada, 20 décembre 2019 : <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/nouvelles/2019/12/le-gouvernement-du-canada-publie-des-projections-demissions-qui-montrent-une-progression-vers-la-cible-climatique.html>.

ECCC (Environnement et Changement climatique Canada) (2019b). Quatrième rapport biennal du Canada sur les changements climatiques, gouvernement du Canada, Gatineau (Québec) : https://unfccc.int/sites/default/files/resource/br4_final_fr.pdf.

ECCC (Environnement et Changement climatique Canada) (2020a). Un environnement sain et une économie saine : le plan climatique renforcé du Canada pour créer des emplois et soutenir la population, les communautés et la planète, gouvernement du Canada, Gatineau (Québec) : https://www.canada.ca/content/dam/eccc/documents/pdf/climate-change/climate-plan/plan_environnement_sain_economie_saine.pdf.

ECCC (Environnement et Changement climatique Canada) (2020b). Rapport d'inventaire national 1990-2018 : sources et puits de gaz à effet de serre au Canada, gouvernement du Canada, Gatineau (Québec) : <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/emissions-gaz-effet-serre/inventaire.html>.

EDC (Exportation et développement Canada) (2020). Avenir radieux pour les technologies propres au Canada : <https://www.edc.ca/fr/guide/canada-avenir-technologies-propres.html>.

Edger, R., C. Howard, M. Lem, J. Zigby, C. Pétrin-Desrosiers, H.M. Doyle, G. T. Kitching, O.D. Luo, A. Cohen, K. Wu, J. J. Kirsh Carson, S.G. Létourneau et J. Kuhl (2020). Plan de traitement pour une relance en santé, Association Canadienne des Médecins pour l'Environnement : https://cape.ca/wp-content/uploads/2020/07/ACME_Rapport2020_FR_PlandeTraitementpouruneRelanceenSante.pdf?download=1.

EESI (Environmental and Energy Study Institute) (2019). Fact Sheet: The Growth in Greenhouse Gas Emissions for Commercial Aviation : <https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-the-growth-in-greenhouse-gas-emissions-from-commercial-aviation>.

Emissions Reduction Alberta (2020). Alberta Zero Emissions Truck Electrification Collaboration (AZTEC) : <https://eralberta.ca/projects/details/alberta-zero-emissions-truck-electrification-collaboration-azetec/>.

Energy Transitions Commission (2020). Une économie mondiale zéro-carbone? Mission réalisable : <https://www.energy-transitions.org/publications/making-mission-possible/>.

Ewing, R. et R. Cervero (2001). « Travel and the Built Environment: A Synthesis », Transportation Research Record, vol. 1780, n° 1, p. 87-114.

Fardet, A. et E. Rock (2020). « Ultra-Processed Foods and Food System Sustainability: What Are the Links? », Sustainability, vol. 12, n° 15, p. 6280 : <https://doi.org/10.3390/su12156280>.

Fortis BC (2020a). Services: Renewable Natural Gas : <https://www.fortisbc.com/services/sustainable-energy-options/renewable-natural-gas>.

Fortis BC (2020b). FortisBC first to purchase Renewable Natural Gas made from wood waste, 30 avril 2020 : <https://www.fortisbc.com/news-events/media-centre-details/2020/04/30/fortisbc-first-to-purchase-renewable-natural-gas-made-from-wood-waste>.

Frank, L. D. et P.O. Engelke (2001). « The built environment and human activity patterns: Exploring the impacts of urban form on public health », Journal of Planning Literature, vol. 16, n° 2 (novembre), p. 202-218.

Frenette, E., O. Bahn et K. Vaillancourt (2017). « Meat, dairy and climate change: assessing the long-term mitigation potential of alternative agri-food consumption patterns in Canada », Environmental Modeling & Assessment, vol. 22, n° 1 (février), p. 1-16.

Fuhrman, J., H. McJeon, P. Patel, S.C. Doney, W.M. Shobe et A.F. Clarens (2020). « Food-energy-water implications of negative emissions technologies in a +1.5 °C future », Nature Climate Change, vol. 10, p. 920-927 : <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0876-z>.

Furman, J., R. Shadbegian et J. Stock (2015). The costs of delaying action to stem climate change: A meta-analysis, VOXeu, Centre for Economic Policy Research : <https://voxeu.org/article/cost-delaying-action-stem-climate-change-meta-analysis#fn>.

Garcia-Oliva, F. et O. R. Masera (2004). « Assessment and Measurement Issues Related to Soil Sequestration in Land-Use, Land-Use Change, and Forestry (LULUCF) Projects under the Kyoto Protocol », Climate Change, vol. 65, p. 347-364 : <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000038211.84327.d9>.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) (2018). Summary for Policymakers, dans Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, éd. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor et T. Waterfield : <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>.

Giles-Corti, B., S. Foster, T. Shilton et R. Falconer (2010). « The co-benefits for health of investing in active transportation », New South Wales Public Health Bulletin, vol. 21, n° 6 (août), p. 122-127.

Gould, G., D. McCollum et D. Greene (2009). Greenhouse Gas Emissions from Aviation and Marine Transportation: Mitigation Potential and Policies. Pew Center on Global Climate Change : <https://www.c2es.org/site/assets/uploads/2009/12/ghg-emissions-aviation-marine-transportation-mitigation-potential-policies.pdf>.

Gouvernement de la Colombie-Britannique (2018). Clean BC : https://blog.gov.bc.ca/app/uploads/sites/436/2019/02/CleanBC_Full_Report_Updated_Mar2019.pdf.

Gouvernement de la Colombie-Britannique (2020). Province puts in place rules for 100% electric-vehicle sales by 2040, 30 juillet 2020 : <https://news.gov.bc.ca/releases/2020EMPR0031-001416>.

Gouvernement des États-Unis (2016). United States Mid-Century Strategy for Deep Decarbonization : https://unfccc.int/files/focus/long-term_strategies/application/pdf/mid_century_strategy_report-final_red.pdf.

Gouvernement du Canada (2016). Rapport final du groupe de travail sur les possibilités d'atténuation spécifiques.

Gouvernement du Canada (2019). À propos des émissions de méthane : <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/initiative-mondiale-methane/a-propos-emissions-methane.html>.

Gouvernement du Québec (2020). Plan pour une économie verte 2030 : <https://www.quebec.ca/gouv/politiques-orientations/plan-economie-verte/>.

Gouvernement du Royaume-Uni (2020). PM outlines his Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution for 250,000 jobs, 18 novembre 2020 : <https://www.gov.uk/government/news/pm-outlines-his-ten-point-plan-for-a-green-industrial-revolution-for-250000-jobs>.

Hall, Max (2019). Alberta approves Canada's largest PV project — free of subsidy and planned on a merchant basis, PV Magazine, 28 août 2019 : <https://www.pv-magazine.com/2019/08/28/alberta-gives-approval-for-canadas-largest-pv-project/>.

Hampel, Carrie (2019). Sweden to ban sales of fossil-fuel powered cars by 2030, Electrive, 22 janvier 2019 : <https://www.electrive.com/2019/01/22/Suède-joins-nations-dropping-combustion-engines-target-2030/>.

Hawken, Paul (2017). Drawdown: The most comprehensive plan ever proposed to reverse global warming. New York, Penguin Books.

Hill, J., S. Polasky, E. Nelson, D. Tilman, H. Huo, L. Ludwig, J. Neumann, H. Zheng et D. Bonta (2009). « Climate change and health costs of air emissions from biofuels and gasoline », Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 106, n° 6 (février), p. 2077-2082.

Hoegh-Guldberg, O., D. Jacob, M. Taylor, M. Bindi, S. Brown, I. Camilloni, A. Diedhiou, R. Djalante, K. L. Ebi, F. Engelbrecht, J. Guiot, Y. Hi-

jioka, S. Mehrotra, A. Payne, S.I. Seneviratne, A. Thomas, R. Warren et G. Zhou (2018). Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems, dans Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, éd. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor et T. Waterfield : <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-3/>.

Hoicka, C.E., K. Savic et A. Campney (2020). Reconciliation through renewable energy? Surveying communities, involvement, and Indigenous peoples in Canada (document de travail), Toronto (Ontario) : Université York.

Husky Energy (2020). Lloydminster Ethanol Plant : <https://huskygrain.com/lloydminster/lloydminster-ethanol-plant.asp>.

Hyland, J. J., M. Henchion, M. McCarthy et S.N. McCarthy. « The role of meat in strategies to achieve a sustainable diet lower in greenhouse gas emissions: A review », Meat Science vol. 132, p. 189-195. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.04.014>.

IIDD (Institut international du développement durable) (2017). Costs of pollution in Canada: Measuring the impacts on families, businesses, and governments, publications de l'IIDD, Winnipeg (Manitoba) : <https://www.iisd.org/system/files/publications/costs-of-pollution-in-canada.pdf>.

Indigenous Caucus Statement (2020). Indigenous Peoples Statement on Nature-Based Climate Solutions, Sommet des solutions nature pour le climat, 5-6 février 2020 : <https://static1.squarespace.com/static/5dee67fbfc3d2411199251b/t/5e87db456df-85b022533a73a/1585961801593/Indigenous+Caucus+Statement.pdf>.

Indigenous Clean Energy (2020). Accelerating Transition: Economic Impacts of Indigenous Leadership in Catalyzing the Transition to a Clean Energy Future Across Canada : <https://icenet.work/attachment?file=HGOq2DFTWWhIc6jRtUCg%3D%3D>.

Indigenous Leadership Initiative (2020). Indigenous Guardians Program : <https://www.ilinationhood.ca/guardians>.

IRENA (Agence internationale pour les énergies renouvelables) (2015). Renewable Energy Options for Shipping: Technology Brief, Agence internationale pour les énergies renouvelables, Abou Dhabi.

IRENA (Agence internationale pour les énergies renouvelables) (2019). Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects, Agence internationale pour les énergies renouvelables, Abou Dhabi : https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_2019.pdf.

IRENA (Agence internationale pour les énergies renouvelables) (2020). Renewable Power Generation Costs in 2019, Agence internationale pour les énergies renouvelables, Abou Dhabi : https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2019.pdf.

Israël, B. et E. Flanagan (2016). Out with the Coal, in with the New: National benefits of an accelerated phase-out of coal-fires power, Pembina Institute : <https://www.pembina.org/reports/out-with-the-coal-in-with-the-new.pdf>.

Jaccard, M., J. Hoffele et T. Jaccard (2018). « Global carbon budgets and the viability of new fossil fuel projects », Climate Change, vol. 150, p. 15-28 : <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2206-2>.

Jaccard, M., R. Murphy, B. Zuehlke et M. Bragiewicz (2019). « Cities and greenhouse gas reduction: Policy makers or policy takers? », Energy Policy, vol. 134, 110875 : <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.07.011>.

Jayasundara, Susantha, J.A.D. Ranga Niroshan Appuhamy, Ermias Kebeab et Claudia Wagner-Riddle (2016). « Methane and nitrous oxide emissions from Canadian dairy farms and mitigation options: An updated review », Canadian Journal of Animal Science, vol. 96, n° 3 (mai), p. 306-331.

Jenkins, J.D., M. Luke et S. Thernstrom (2018). « Getting to Zero Carbon Emissions in the Electric Power Sector », Joule, vol. 2, n° 12, p. 2498-2510 : <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.11.013>.

Johansson, T. B., A. Patwardhan, N. Nakicenovic, L. Gomez-Echeverri, W.C. Turkenburg et Global Energy Assessment GEA Council (2012). Global Energy Assessment Toward a Sustainable Future, Cambridge (Royaume-Uni), Cambridge University Press.

JWN Energy (2020). New future for Alberta bitumen in advanced materials : <https://www.jwnenergy.com/article/2020/1/16/new-future-alberta-bitumen-advanced-materials/>.

Kampman, N., A. Busch, P. Bertier, J. Snippe, S. Hangx, V. Pipich, Z. Di, G. Rother, J. F. Harrington, J. P. Evans, A. Maskell, H. J. Chapman et M.J. Bickle (2016). « Observational evidence confirms modelling of the long-term integrity of CO₂-reservoir caprocks », Nature Communications, vol. 7, n° 12 : <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms12268>.

Krechowicz, Dana (2011). The Effect of Carbon Pricing on Low-Income Households, and Its Potential Contribution to Poverty Reduction, Sustainable Prosperity : <https://institute.smartprosperity.ca/sites/default/files/effect-carbon-pricing-low-income-households-and-its-potential-contribution-poverty-reduction.pdf>.

Lachapelle, U. et D.G. Pinto (2016). « Longer or more frequent walks: examining the relationship between transit use and active transportation in Canada », Journal of Transport & Health, vol. 3, n° 2 (juin), p. 173-180.

Langlois-Bertrand, S., K. Vaillancourt, O. Bahn, L. Beaumier et N. Mousseau (2018). Perspectives énergétiques canadiennes 2018 – Horizon 2050, Institut de l'énergie Trottier et Pôle e3 : <https://iet.polymtl.ca/perspectives-energetiques/>.

Layzell, D. B., C. Young, J. Lof, J. Leary et S. Sit (2020). « Towards Net-Zero Energy Systems in Canada: A Key Role for Hydrogen », Transition Accelerator Reports, vol. 2, n° 3 : <https://transitionaccelerator.ca/towards-net-zero-energy-systems-in-canada-a-key-role-for-hydrogen/>.

Lelieveld, J., A. Pozzer, U. Pöschl, M. Fnais, A. Haines et T. Münzel (2020). « Loss of life expectancy from air pollution compared to other risk factors: a worldwide perspective », *Cardiovascular Research*, vol. 116, n° 11 (mars), p. 1910-1917.

Lempert, R., J. Edmonds, T. Wild, M. Binsted et E. Diringier (2019). Pathways to 2050: Alternative scenarios for decarbonizing the U.S. economy, Center for Climate and Energy Solutions (C2ES) : <https://www.c2es.org/site/assets/uploads/2019/05/pathways-to-2050-scenarios-for-decarbonizing-the-us-economy-final.pdf>.

Leyden, Kevin M (2003). « Social capital and the built environment: the importance of walkable neighborhoods », *American Journal of Public Health*, vol. 93, n° 9 (septembre), p. 1546-1551.

Litman, Todd (2015). Evaluating public transit benefits and costs, Victoria Transport Policy Institute, Victoria (Colombie-Britannique) : <https://www.vtpi.org/tranben.pdf>.

Little Bear, Leroy (2009). Naturalizing Indigenous Knowledge : Synthesis Paper, Université de la Saskatchewan, Aboriginal Education Research Centre, Saskatoon (Saskatchewan) et First Nations and Adult Higher Education Consortium, Calgary (Alberta) : http://neatoeco.com/iwseconference.org/wp-content/uploads/2015/08/NaturalizingIndigenousKnowledge_LeroyLittlebear.pdf.

Little Bear, Leroy (2012). « Traditional knowledge and humanities: A perspective by a Blackfoot », *Journal of Chinese Philosophy*, vol. 39, n° 4, p. 518-527.

Lovekin, D., J. Moorhouse, V. Morales et B. Salek (2020). Diesel Reduction Progress in Remote Communities, Pembina Institute : <https://www.pembina.org/pub/diesel-reduction-progress-remote-communities>.

Lund, Hollie (2002). « Pedestrian environments and sense of community », *Journal of Planning Education and Research*, vol. 21, n° 3 (mars), p. 301-312.

Mai, Trieu, Paige Jadun, Jeffrey Logan, Colin McMillan, Matteo Muratori, Daniel Steinberg, Laura Vimmerstedt, Ryan Jones, Benjamin Haley et Brent Nelson (2018). Electrification Futures Study: Scenarios of Electric Technology Adoption and Power Consumption for the United States, National Renewable Energy Laboratory : <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/71500.pdf>.

Makortoff, Kayleena (2020). « Make climate risk reports mandatory for 480 FTSE firms, say investors », *The Guardian*, 19 octobre 2020 : <https://www.theguardian.com/environment/2020/oct/19/call-climate-risk-reports-mandatory-ftse-listed-firms>.

Manisalidis, I., E. Stavropoulou, A. Stavropoulos et E. Bezirtzoglou (2020). « Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review », *Frontiers in Public Health*, vol. 8 : <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>.

McKinsey and Company (2020). « Climate math: What a 1.5-degree pathway would take », *McKinsey Quarterly*, 30 avril 2020 : <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/climate-math-what-a-1-point-5-degree-pathway-would-take>.

McLaren, Duncan Peter, David P. Tyfield, Rebecca Willis, Bron Szerszynski et Nils O. Markusson (2019). « Beyond 'Net-Zero': a case for separate targets for emissions reduction and negative emissions », *Frontiers in Climate*, vol. 1, n° 4.

Milman, Oliver (2020). « Carbon capture 'moonshot' moves closer, as billions of dollars pour in », *The Guardian*, 7 octobre 2020 : <https://www.theguardian.com/environment/2020/oct/07/carbon-capture-moonshot-moves-closer-as-billions-of-dollars-pour-in>.

Ministère de l'Énergie des États-Unis (2020). Grid Modernization and the Smart Grid : <https://www.energy.gov/oe/activities/technology-development/grid-modernization-and-smart-grid>.

Ville de Vancouver (2020). Streets and Transportation: Walk, Bike and Transit : <https://vancouver.ca/streets-transportation/walk-bike-and-transit.aspx>.

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (2019). Trajectoires de réduction d'émissions de GES du Québec – Horizons 2030 et 2050, gouvernement du Québec : <http://www.environnement.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/trajec-toires-emissions-ges.pdf>.

Mobilité électrique Canada (2020). Electric Mobility Canada Sales Report 2020 Q1.

Namazu, Michiko, Don MacKenzie, Hisham Zerriffi et Hadi Dowlatabadi (2018). « Is carsharing for everyone? Understanding the diffusion of carsharing services », *Transport Policy*, vol. 63 (avril), p. 189-199.

Nature United (2020). Łutsël K'é Dene First Nation Wins Prestigious Equator Prize for its Work on Thaidene Néné, 5 juin 2020 : <https://www.natureunited.ca/newsroom/thaidene-nene-equator-prize/>.

Navius Research (2015). A Plan for Climate Leadership in British Columbia: Forecasting the Benefits and Costs of Strengthening British Columbia's Greenhouse Gas Policies, préparé pour Énergie propre Canada : <https://cleanenergycanada.org/wp-content/uploads/2018/03/A-Plan-for-Climate-Leadership-in-BC-Final-Oct-27-12pm-2015.pdf>.

Navius Research (2021). Achieving net zero emissions by 2050 in Canada: An evaluation of pathways to reach net zero prepared for the Canadian Institute for Climate Choices : <https://www.naviusresearch.com/publications/climate-choices-net-zero/>.

OACI (Organisation de l'aviation civile internationale) (2019). 2019 Environmental Report: Aviation and Environment, publications de l'OACI : [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-FI-WEB%20\(1\).pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO-ENV-Report2019-FI-WEB%20(1).pdf).

OMI (Organisation maritime internationale) (2020). « OMI 2020 » : réduction des émissions d'oxydes de soufre des navires : <https://www.imo.org/fr/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>.

Organisation mondiale de la Santé (2016). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease : <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/250141/9789241511353-eng.pdf>.

Passive House Canada (2020). Fort St. John 50 Unit Passive House : <https://www.passivehousecanada.com/projects/fort-st-john-multi-family-housing/>.

Phanord-Cadet, M-N., K. Pineault, K. She, A. Sinha et G. Reed (2018). Travail en cours préparer la main-d'œuvre canadienne à la transition énergétique mondiale, Forum des politiques publiques : <http://www.actioncanada.ca/wp-content/uploads/2019/03/PPF-Travail-En-Cours-FR-March2018.pdf>.

Phillips 66 (2020). Phillips 66 Plans to Transform San Francisco Refinery into World's Largest Renewable Fuels Plant, 12 août 2020 : <https://investor.phillips66.com/financial-information/news-releases/news-release-details/2020/Phillips-66-Plans-to-Transform-San-Francisco-Refinery-into-Worlds-Largest-Renewable-Fuels-Plant/default.aspx>.

Projet Trottier pour l'avenir énergétique (2016). Canada's Challenge and Opportunity: Transformations for major reductions in GHG emissions, Fondation familiale Trottier, l'Académie canadienne du génie et Fondation David Suzuki : <https://david Suzuki.org/wp-content/uploads/2017/09/REPORT-canada-challenge-opportunity-transformations-major-reductions-GHG-emissions.pdf>.

Régie de l'énergie du Canada (2017). Aperçu du marché : Comprendre les coûts élevés de l'énergie dans le Nord canadien, gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario) : <https://www.cer-rec.gc.ca/fr/donnees-analyse/marches-energetiques/aperçu-marchés/2017/aperçu-marché-comprendre-coûts-élevés-énergie-dans-nord-canadien.html>.

Reisinger, Andy, Harry Clark, Ross Abercrombie, Mark Aspin, Peter Ettema, Mark Harris, Andrew Hoggard, Matthew Newman et Greg Sneath (2018). Future options to reduce biological GHG emissions on-farm: critical assumptions and national-scale impact, Rapport au Biological Emissions Reference Group (BERG).

RNCan (Ressources naturelles Canada) (2016). Évaluation des obstacles à la participation des particuliers aux activités de réduction des gaz à effet de serre, gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario) : https://www.rncan.gc.ca/energie/efficacite/collectivites-infrastructures/transports/ralenti/4468?_ga=2.81393936.64357677.1610989223-1552246580.1609265813.

RNCan (Ressources naturelles Canada) (2017). Soutenir les applications d'énergie propre avec des minéraux et des métaux canadiens, gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario) : https://www.rncan.gc.ca/science-data/science-research/earth-sciences/earth-sciences-resources/earth-sciences-federal-programs/soutenir-les-applications-denergie-propre/19448?_ga=2.177356706.64357677.1610989223-1552246580.1609265813.

RNCan (Ressources naturelles Canada) (2019a). Consommation d'énergie secondaire du secteur résidentiel par source d'énergie et utilisation finale, gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario) : <https://bee.rncan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/showTable.cfm?type=HB§or=res&juris=00&rn=1&page=6>.

RNCan (Ressources naturelles Canada) (2019b). Faits sur l'aluminium, gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario) : https://www.rncan.gc.ca/science-data/science-research/earth-sciences/earth-sciences-resources/earth-sciences-federal-programs/faits-sur-laluminium/20568?_ga=2.142946610.64357677.1610989223-1552246580.1609265813.

RNCan (Ressources naturelles Canada) (2020a). Cahier d'information sur l'énergie 2019-2020, gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario) : https://www.rncan.gc.ca/sites/www.rncan.gc.ca/files/energy/pdf/Cahier%20d%E2%80%99information%20sur%20l%E2%80%99C3%A9nergie%202019_2020_webresolution.pdf.

RNCan (Ressources naturelles Canada) (2020b). Calculateur des équivalences des émissions de gaz à effet de serre, gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario) : <https://bee.rncan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/calculateur/calculateur-ges.cfm>.

RNCan (Ressources naturelles Canada) (2020c). Faits sur le pétrole brut, gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario) : https://www.rncan.gc.ca/science-donnees/donnees-analyse/donnees-analyse-energetiques/faits-saillants-sur-lenergie/faits-petrole-brut/20075?_ga=2.85119902.64357677.1610989223-1552246580.1609265813.

RNCan (Ressources naturelles Canada) (2020d). Faits sur le gaz naturel, gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario) : https://www.rncan.gc.ca/science-donnees/donnees-analyse/donnees-analyse-energetiques/faits-saillants-sur-lenergie/faits-gaz-naturel/20078?_ga=2.113499392.64357677.1610989223-1552246580.1609265813.

RNCan (Ressources naturelles Canada) (2020e). L'Atlas du Canada – Base de données sur l'énergie dans les collectivités éloignées, gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario) : <https://atlas.gc.ca/rced-bdece/fr/index.html>.

RNCan (Ressources naturelles Canada) (2020f). Techniques de conduite écoénergétique, gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario) : https://www.rncan.gc.ca/efficacite-energetique/efficacite-energetique-pour-les/vehicules-personnels/techniques-de-conduite-ecoenergetique/21039?_ga=2.81386768.64357677.1610989223-1552246580.1609265813.

Sanderson, B.M. et B.C. O'Neill (2020). « Assessing the costs of historical inaction on climate change », Scientific Reports, vol. 10, n° 9173 (2020) : <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66275-4>.

Santé Canada (2012). Évaluation des risques pour la santé humaine liés à la production, la distribution et l'utilisation de biodiesel au Canada, gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario) : <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/vie-saine/evaluation-risques-pour-sante-humaine-lies-production-distribution-et-utilisation-biodiesel-canada.html>.

Santé Canada (2019a). Les impacts sur la santé de la pollution de l'air au Canada : Estimation de la morbidité et des décès prématurés, gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario) : http://publications.gc.ca/collections/collection_2019/sc-hc/H144-51-2019-fra.pdf.

Santé Canada (2019b). Évaluation des risques pour la santé humaine des gaz d'échappement des moteurs diesel, gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario) : <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/vie-saine/evaluation-risques-pour-sante-humaine-gaz-echappement-moteurs-diesel-sommaire.html>.

Sawyer, D. (2020). Canada's performance in six key areas of clean-energy exports is growing three times faster than all other product exports, Policy Options, 17 novembre 2020 : <https://policyoptions.irpp.org/magazines/november-2020/canadas-clean-energy-gazelles-are-outperforming-fossil-fuels/>.

Sawyer, D., R. Ness, D. Clark et D. Beugin (2020). La pointe de l'iceberg : composer avec les coûts connus et inconnus des changements climatiques au Canada, Institut canadien pour des choix climatiques : <https://choixclimatiques.ca/reports/la-pointe-de-iceberg/>.

Sepulveda, N. A., J. D. Jenkins, F. J. de Sisternes et R. K. Lester (2018). « The Role of Firm Low-Carbon Electricity Resources in Deep Decarbonization of Power Generation », *Joule*, vol. 2, n° 11, p. 2403-2420 : <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.08.006>.

Shell (2018). Sky: Meeting the Goals of the Paris Agreement, Shell Scenarios : https://www.shell.com/promos/business-customers-promos/download-latest-scenario-sky/_jcr_content.stream/1530643931055/eca19f7fc0d20adbe830d3b0b27bcc9ef72198f5/shell-scenario-sky.pdf.

Sims R., R. Schaeffer, F. Creutzig, X. Cruz-Núñez, M. D'Agosto, D. Dimitriu, M. J. Figueroa Meza, L. Fulton, S. Kobayashi, O. Lah, A. McKinnon, P. Newman, M. Ouyang, J. J. Schauer, D. Sperling et G. Tiwari (2014). Transport climate change 2014: Mitigation of climate change, dans Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, éd. O. Edenhofer et coll., Cambridge et New York, Cambridge University Press : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter8.pdf.

Soltanzadeh, M. et A. Hakami (2020). Air quality health co-benefits of CO₂ reductions in various decarbonization pathways : <https://climatechoices.ca/wp-content/uploads/2020/12/Air-Quality-Health-Co-benefits-of-Co2-Reductions-in-Various-Decarbonization-Paths-Nov-2020-2.pdf>.

St-Louis, E., K. Manaugh, D. van Lierop et A. El-Geneidy (2014). « The happy commuter: A comparison of commuter satisfaction across modes », *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 26 (septembre), p. 160-170.

Statistique Canada (2017). Déplacement domicile-travail : faits saillants du Recensement de 2016, gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario) : https://www150.statcan.gc.ca/n1/fr/daily-quotidien/171129/dq171129c-fra.pdf?st=6EI_Dgrq.

Statistique Canada (2020). Un ménage canadien sur dix avait des besoins impérieux en matière de logement en 2018, gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario) : <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/201002/dq201002a-fra.htm>.

Suncor (2020). Biocarburants : <https://www.suncor.com/fr-ca/a-de-propos-nous/biocarburants>.

Table de stratégies économiques sur les technologies propres (2019). L'impératif de l'innovation et de la compétitivité : Saisir les occasions de croissance – Rapport des Tables de stratégies économiques du Canada : Technologies propres, Innovation, Sciences et Développement économique Canada, gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario) : [https://www.ic.gc.ca/eic/site/098.nsf/vwapj/ISED.TechnologiesPropres.pdf/\\$file/ISED.TechnologiesPropres.pdf](https://www.ic.gc.ca/eic/site/098.nsf/vwapj/ISED.TechnologiesPropres.pdf/$file/ISED.TechnologiesPropres.pdf).

Thamo, T. et D.J. Pannell (2016). « Challenges in developing effective policy for soil sequestration: perspectives on additionality, leakage, and permanence », *Climate Policy*, vol. 16, n° 8, p. 973-992 : <http://dx.doi.org/10.1080/14693062.2015.1075372>.

The Economist (2020). Not so choppy: How covid-19 put wind in shipping companies' sails, 10 octobre 2020 : <https://www.economist.com/business/2020/10/10/how-covid-19-put-wind-in-shipping-companies-sails>.

Thirgood, J., S. McFatridge, M. Marcano et J. Van Ymeren (2017). Decent Work in the Green Economy, Mowat Centre for Policy Innovation : <https://munkschool.utoronto.ca/mowatcentre/decent-work-in-the-green-economy/>.

Thomas, Gregory O., Ian Walker et Charles Musselwhite (2014). « Grounded Theory analysis of commuters discussing a workplace carbon-reduction target: Autonomy, satisfaction, and willingness to change behaviour in drivers, pedestrians, bicyclists, motorcyclists, and bus users », *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 26 (septembre), p. 72-81.

Townsend, J., F. Moola et M-K. Craig (2020). Indigenous Peoples are critical to nature-based solutions to climate change, iPolitics, 26 octobre 2020 : <https://ipolitics.ca/2020/10/26/indigenous-peoples-are-critical-to-nature-based-solutions-to-climate-change>.

Transports Canada (2011). Guide de planification et de ressources sur les transports actifs au Canada, Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario) : <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1105378.pdf>.

TRNEE (Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie) (2011). Prospérité climatique, Le prix à payer : répercussions économiques du changement climatique pour le Canada, Ottawa (Ontario) : https://data.fcm.ca/documents/reports/PCP/paying_the_price_FR.pdf.

Tsiropoulos, I., W. Nijs, D. Tarvydas et P. Ruiz (2020). Towards net-zero emissions in the EU energy system by 2050, Commission européenne : <https://www.buildup.eu/sites/default/files/content/toward1.pdf>.

Vivid Economics (2020). An investor guide to negative emissions technologies and the importance of land use : <https://www.unpri.org/download?ac=11980>.

Wynes, Seth et Kimberly A. Nicholas (2018). « Reply to Second comment on 'The climate mitigation gap: education and government recommendations miss the most effective individual actions' », *Environmental Research Letters*, vol. 13, n° 6 (juillet), 068002.

REMERCIEMENTS

AUTEURS DU PERSONNEL

Jason Dion, Directeur de recherche atténuation, Institut canadien pour des choix climatiques

Anna Kanduth, Associée de recherche, Institut canadien pour des choix climatiques

Jeremy Moorhouse, Associé de recherche principal, Institut canadien pour des choix climatiques

Dale Beugin, Vice-président Recherche et analyse, Institut canadien pour des choix climatiques

MEMBRES EXPERTS DU COMITÉ ATTÉNUATION

Louis Beaumier, Directeur exécutif, Institut de l'énergie Trottier

Kathryn Harrison, Professeure de sciences politiques, Université de la Colombie-Britannique

Mark Jaccard, Directeur et professeur émérite, School of Resource and Environmental Management, Université Simon Fraser

David Layzell, Directeur, Initiative canadienne de recherche sur l'analyse des systèmes énergétiques (CESAR), Université de Calgary

Justin Leroux, Professeur au département de l'économie appliquée, HEC Montréal

Nancy Olewiler, Professeure, École de politique publique, Université Simon Fraser

Catherine Potvin, Chaire de recherche du Canada sur l'atténuation des changements climatiques et la forêt tropicale, Université McGill

Nicholas Rivers, Chaire de recherche du Canada sur les politiques climatiques et énergétiques, Université d'Ottawa

Jennifer Winter, professeure adjointe au Département d'économie et directrice scientifique de la Division de la recherche sur les politiques énergétiques et environnementales de la School of Public Policy, Université de Calgary

RÉVISEURS EXTERNES

Sarah Burch, Chaire de recherche du Canada en gouvernance de la durabilité et en innovation, Université de Waterloo

Ron Mock, Ancien président et directeur général, Conseil du régime de retraite des enseignants de l'Ontario

Graeme Reed, Candidat au doctorat, Université de Guelph

Blake Shaffer, Professeur assistant, Département d'économie et École de politique publique, Université de Calgary

RÉVISIONS ADDITIONNELLES ET CONSEILS

Jonathan Arnold, Associé de recherche principale, Institut canadien pour des choix climatiques

Audrey Aubertin, Candidate à la maîtrise, Gestion des ressources et de l'environnement (REM), École de gestion des ressources et de l'environnement, Université Simon Fraser

Chris Bataille, Chercheur principal, Institut du Développement Durable et des Relations Internationales (IDDRl) ; Professeur adjoint, Faculté de l'Environnement de l'Université Simon Fraser

Alicia Campney, Assistante de recherche, Institut canadien des choix climatiques

Dylan Clark, Associé de recherche principal, Institut canadien pour des choix climatiques

Caroline Lee, Associée de recherche principale, Institut canadien pour des choix climatiques

Melina Laboucan-Massimo, directrice de la transition équitable du Indigenous Climate Action et chercheure à la Fondation David Suzuki

James Meadowcroft, Professeur de sciences politiques et de politique publique, Université Carleton

Katherine Monahan, gestionnaire de l'engagement, Vivid Economics

Rachel Samson, Directrice de recherche croissance propre, Institut canadien pour des choix climatiques

Dave Sawyer, Économiste principal, Institut canadien pour des choix climatiques

Maria Shallard, Conseiller principal, engagement et recherche autochtone, Institut canadien pour des choix climatiques

Chris Turner, Auteur et stratège en communications énergétiques

PRODUCTION SUPPORT

Conception et mise en page | Laurie Barnett, Designer graphique

Révision | Julie Stauffer, Cadmium Red Communications (anglais); Edith Sans Cartier (français)

Traduction | Edgar (texte) et Sabine Monnin (figures)

Présentation des données par Voilà: chezVoila.com

Design de la page couverture: Alex Wittholz

Photo de la figure 18: Jens Johnsson sur Unsplash

Photographie de couverture: Paul Zizka, un kayakiste sur le Goat Pond, AB

Avis de non-responsabilité : Ce rapport est un document consensuel représentant le point de vue de l'Institut canadien pour des choix climatiques. Il ne reflète pas nécessairement les points de vue des organisations auxquelles l'Institut est affiliée. Toute erreur éventuelle dans ce rapport est imputable à l'Institut.

Copyright © 2021 Institut canadien pour des choix climatiques.

Tous droits réservés. Il est permis de reproduire tout ou partie de cette publication à des fins non commerciales, pour autant que la source soit citée.

Citation recommandée :

Dion, J., A. Kanduth, J. Moorhouse, and D. Beugin. 2021. Vers un Canada carboneutre: s'inscrire dans la transition globale. Institut canadien pour des choix climatiques.

Ce projet a été réalisé avec le soutien financier de:



Environment and
Climate Change Canada

Environnement et
Changement climatique Canada

