

Objectif zéro émission

Feuille de route de la
transition énergétique
du Canada – Une revue

© 2019 Fondation David Suzuki

ISBN (version imprimée) : 978-1-988424-31-6

ISBN (version numérique) : 978-1-988424-32-3

Les données canadiennes de catalogage avant publication pour ce rapport peuvent être consultées auprès de Bibliothèque et Archives Canada.

Par : Tom L Green, Ph. D., Fondation David Suzuki

COLLABORATEURS

L'auteur remercie tout particulièrement Brett Dolter, Ph. D., pour son importante contribution à ce rapport et son évaluation de modèles de décarbonisation profonde et de la littérature s'y rapportant.

Conseillers techniques : Chris Bataille, Ph. D.; Ian Bruce, James Glave et Ian Hanington.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier les réviseurs suivants :

Mark Jaccard, Ph. D., Marc Lee, Normand Mousseau, Ph. D., Sylvie Trottier, Peter Victor, Ph. D., Dan Woynillowicz et deux réviseurs anonymes.

Bien que l'auteur remercie les pairs réviseurs pour leurs contributions, le contenu et les recommandations du rapport n'engagent que la responsabilité de l'auteur et de la Fondation David Suzuki.

La publication de ce rapport a été rendue possible grâce au généreux soutien financier de la Fondation familiale Trottier. Nous désirons également remercier la Peter Gilgan Foundation.

Le présent document est le premier d'une série de rapports de l'initiative Une feuille de route pour accélérer la transition énergétique au Canada.

Conception graphique et production : Sara Bailey, Mika Creative

cleanpowerpathways.org



Préface

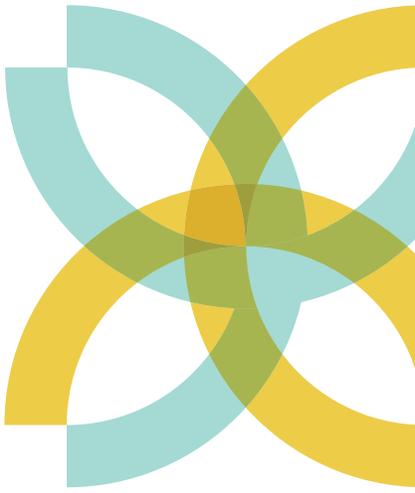
La transition énergétique s'accélère au Canada et partout dans le monde. Une feuille de route pour accélérer la transition énergétique au Canada est le premier projet de recherche portant sur l'intégration des énergies renouvelables et de l'électricité propre à l'échelle canadienne. Ce rapport, **Objectif zéro émission : Feuille de route de la transition énergétique** en jette les bases à travers une revue de la recherche et des modèles de décarbonisation.

Sous l'effet de l'action humaine, le climat de notre planète est sur le point de basculer. Le Canada se réchauffe à un rythme deux fois plus élevé que la moyenne mondiale, soulignant le besoin urgent d'examiner les nombreuses options pour atteindre nos objectifs et engagements de réduction de nos émissions de gaz à effet de serre dans le cadre de l'Accord de Paris. La recherche et l'engagement qui composent cette étude contribueront à nous guider sur ce chemin.

L'électrification et le déploiement accéléré des énergies propres seront au cœur des efforts du Canada pour devenir neutre en carbone d'ici le milieu du siècle. Le Canada a la chance d'être un des endroits au monde où le potentiel d'énergies renouvelables est le plus grand et où la transition énergétique sera la plus profitable. Déjà le Québec a entrepris un vaste chantier d'électrification de son économie, l'électrification des transports s'accélère en Colombie-Britannique et au Québec, et les énergies renouvelables remplacent graduellement le charbon d'un bout à l'autre du pays. L'électricité propre sera le pilier fondamental de notre avenir énergétique.

Une feuille de route pour accélérer la transition énergétique au Canada

est une collaboration pluriannuelle réunissant des chercheurs universitaires et la Fondation David Suzuki. Son objectif est de bâtir des appuis larges et durables pour une série d'actions qui permettront de transformer le système énergétique du Canada à une envergure, à une échelle et à une vitesse qui se conforment aux exigences du consensus scientifique sur les changements climatiques.



Le défi posé par les changements climatiques peut sembler insurmontable, mais des études mettent en lumière les nombreuses options et solutions disponibles pour atteindre nos objectifs.



Les travaux s'appuieront sur la recherche d'organisations gouvernementales, académiques, à but non lucratif et du secteur économique et industriel pour identifier la combinaison de priorités et d'approches la plus efficace pour atteindre les objectifs climatiques et énergétiques du Canada. Cette initiative fait suite au Projet Trottier pour l'avenir énergétique, un effort de recherche et de modélisation visant à déterminer comment le Canada peut réduire considérablement ses émissions de gaz à effet de serre, parrainé par l'Académie canadienne du génie et la Fondation David Suzuki, avec le soutien de la Fondation familiale Trottier, et dont le rapport final a été publié en avril 2016. Le partenariat de la Fondation avec des chercheurs universitaires pour le projet **Une feuille de route pour accélérer la transition énergétique au Canada** reproduira l'approche novatrice et collaborative de ce projet initial.

Le défi posé par les changements climatiques peut sembler insurmontable, mais des études mettent en lumière les nombreuses options et solutions disponibles pour atteindre nos objectifs. En exploitant les meilleures connaissances scientifiques et les meilleures analyses de politiques publiques, nous pouvons relever le défi de l'urgence climatique et orienter le Canada sur la voie d'un modèle énergétique sobre en carbone et d'une économie verte et prospère pour les générations futures.

Notre avenir ne sera pas déterminé par le hasard, mais par les choix que nous ferons dans les prochaines années. J'espère que vous vous joindrez à nous pour accélérer la transition vers les énergies propres au Canada.



Karel Mayrand

Directeur pour le Québec et l'Atlantique, Fondation David Suzuki



Table des matières

Collaborateurs et Remerciements	2
Préface	3
Table des matières	6
Résumé	7
<hr/>	
Introduction : les défis et occasions liés à l'atteinte de l'objectif zéro	11
Ce que nous avons fait	15
10 stratégies pour réduire de façon importante les émissions de GES	19
1. Accélérer la transition vers l'énergie propre	20
2. Faire plus avec moins d'énergie	26
3. Électrifier presque tout	29
4. Libérer l'industrie des émissions	33
5. Passer aux carburants renouvelables	35
6. Mobiliser les ressources financières	38
7. Uniformiser les règles du jeu	43
8. Réinventer nos collectivités	49
9. Se concentrer sur ce qui compte vraiment	51
10. Réaliser une transition équitable	53
Conclusion : que signifie l'atteinte de l'objectif zéro pour le système énergétique canadien?	58
Notes en fin de texte (en anglais seulement)	63
Annexe	76



Résumé

Objectif zéro émission : Feuille de route de la transition énergétique du Canada est la première étape d'une initiative triennale intitulée **Une feuille de route pour accélérer la transition énergétique au Canada**. Le présent rapport jette les bases d'un examen approfondi des modèles et des études qui explorent la décarbonisation au Canada et dans le monde entier. Il met en lumière dix stratégies, mesures et considérations qui, selon un large éventail d'experts, seront au cœur de tout effort crédible visant à réduire à zéro les émissions du Canada d'ici le milieu du siècle, comme la science du climat l'exige. Ensemble, ces stratégies forment la pierre angulaire de l'élaboration de plans climatiques crédibles.

Nous résumons ici les 10 mesures recommandées dans les pages qui suivent.

1. ACCÉLÉRER LA TRANSITION VERS L'ÉNERGIE PROPRE

Une grande partie de la production d'électricité au Canada n'émet pas de dioxyde de carbone, et les chercheurs s'entendent pour dire qu'il est possible d'accélérer cette tendance et d'atteindre nos objectifs climatiques. Toutefois, le Canada ne décarbonisera pas son système énergétique, à moins que les provinces et les services publics ne réduisent énergiquement les émissions de gaz à effet de serre associées à la génération d'électricité jusqu'à ce que l'objectif zéro soit atteint. Diverses possibilités telles que l'énergie propre produite par les propriétaires de maison font leur apparition. Cependant, si nous voulons atteindre nos objectifs climatiques, nous devons assainir nos réseaux électriques et produire beaucoup plus d'énergie propre qu'aujourd'hui.

2. FAIRE PLUS AVEC MOINS D'ÉNERGIE

De tous les investissements potentiels dans le secteur énergétique, l'efficacité est celui qui offre le meilleur rendement. Tous les secteurs de l'économie canadienne peuvent adopter des mesures d'efficacité énergétique et en tirer de multiples avantages. Les gouvernements le font généralement en réglementant le rendement énergétique des nouveaux bâtiments, appareils électroménagers, véhicules et équipements industriels, et en offrant des incitatifs aux consommateurs pour moderniser leurs actifs existants. Quant aux entreprises, elles s'efforcent également d'atteindre leurs propres objectifs internes. À l'heure actuelle, le Canada gaspille beaucoup d'énergie, ce qui laisse entrevoir de grandes possibilités inexploitées.



3. ÉLECTRIFIER PRESQUE TOUT

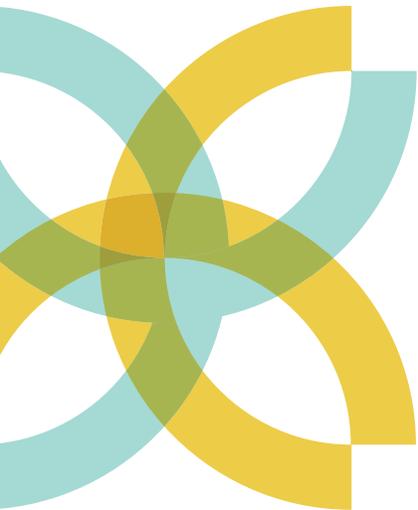
Dans plusieurs provinces au Canada, l'électricité est la source d'énergie la plus propre, mais en 2016 elle ne répondait qu'à 20 % de nos besoins énergétiques. Des études indiquent que d'ici le milieu du siècle, l'électricité propre représentera la moitié ou plus de notre ressource énergétique. À mesure de l'assainissement de nos réseaux, l'électricité propre représentera une part croissante de notre économie, notamment pour chauffer nos bâtiments et alimenter nos voitures, camions et autobus. Même les activités des aciéries et l'exploitation de sables bitumineux peuvent passer à l'électrification. De nombreux projets de recherche ont permis de conclure qu'une plus importante électrification sera un pilier de l'effort en faveur de la décarbonisation au Canada.

4. LIBÉRER L'INDUSTRIE DES ÉMISSIONS

En 2050, le Canada aura encore besoin de ciment, de fer, d'acier, d'aluminium et de produits chimiques. Bien que les entreprises émettent collectivement une grande quantité de carbone pour produire ces produits, des recherches récentes indiquent que cela pourrait changer. Le secteur industriel peut décarboniser ses procédés en limitant au minimum les actifs délaissés, tout en demeurant concurrentiel et en maintenant des emplois sains. Pour ce faire, il faudra opter pour des solutions faisant appel notamment à des technologies d'électrification et de capture du carbone.

5. PASSER AUX CARBURANTS RENOUVELABLES

Bien que les batteries et l'électricité puissent faire le gros du travail, elles ne conviennent pas parfaitement à tous les services énergétiques du Canada. Les secteurs de l'aviation, du transport maritime et d'autres transports lourds, par exemple, auront probablement besoin d'une combinaison de biocarburants, de gaz et d'hydrogène renouvelables. La réduction des coûts de l'électricité renouvelable et l'accroissement de l'offre pourraient faire du Canada un chef de file dans la production d'hydrogène et d'autres combustibles à zéro émission de carbone. Le recensement, la culture et la récolte de manière responsable des ressources nécessaires à la production de biocarburants nous forcent à examiner soigneusement la



gestion des terres et la sélection des espèces. Nous devons également veiller à ce qu'il n'y ait pas de conséquences négatives sur les écosystèmes et les terres dont nous avons besoin pour produire des denrées alimentaires.

6. MOBILISER LES RESSOURCES FINANCIÈRES

Pour effectuer une transition énergétique, il faudra revoir les investissements dans les secteurs de l'économie à fortes émissions de carbone pour les rediriger vers ceux axés sur l'énergie propre. Une grande partie de ces investissements devra être consacrée à la décarbonisation dans le secteur de l'électricité. Des recherches récentes suggèrent que les coûts associés à la décarbonisation seront plus modestes qu'on ne le pense généralement, et confirment que les coûts associés à l'inaction seront beaucoup plus élevés.

7. UNIFORMISER LES RÈGLES DU JEU

Afin de rediriger les investissements au sein de l'économie canadienne, le gouvernement doit envoyer les bons signaux sur le plan de la tarification et des politiques adoptées. Toutes les évaluations crédibles indiquent que le Canada aura besoin d'une tarification du carbone en constante augmentation pour susciter l'innovation et l'adoption des technologies propres sur le chemin vers une décarbonisation réussie d'ici 2050. Ce genre de politique vise à « uniformiser graduellement les règles du jeu » entre l'énergie polluante et l'énergie plus propre. Elle encourage l'efficacité énergétique et le changement de combustible, et stimule l'innovation et l'investissement dans l'économie de l'énergie propre. D'autres politiques et signaux de prix à l'échelle fédérale, provinciale et municipale peuvent contribuer à assainir l'air dans les villes congestionnées et à améliorer le transport et l'efficacité énergétique des bâtiments.

8. RÉINVENTER NOS COLLECTIVITÉS

Les villes et villages du Canada joueront un rôle central dans tout effort crédible de décarbonisation. De nombreuses preuves indiquent que les collectivités bien desservies, denses et viables émettent moins de carbone que les collectivités à faible densité. Des collectivités bien conçues permettent d'offrir un transport en commun et un transport actif abordables tout en améliorant la qualité de vie et la santé. Les administrations locales ont accès à une myriade de politiques visant à réduire les émissions, comme les codes du bâtiment provinciaux et municipaux et les mesures incitatives pour favoriser un développement axé sur le transport en commun et le regroupement. Certaines recherches donnent à penser qu'une conception intelligente des villes pourrait réduire de 15 % ou plus les émissions du Canada.

9. SE CONCENTRER SUR CE QUI COMPTE VRAIMENT

Une forte croissance économique offre des avantages, mais entraîne aussi des coûts réels qui sont trop facilement ignorés. L'apport en ressources à haute valeur énergétique nécessaires à l'augmentation de la croissance a des effets néfastes sur les populations et les écosystèmes. Les Canadiens peuvent choisir de revoir les mesures fondamentales que nous utilisons pour définir la prospérité, comme le PIB, et d'adopter plutôt celles qui mesurent le bien-être.

Ce faisant, ils réduiront les défis d'ingénierie nécessaires pour réduire à zéro les émissions de carbone. Lorsque nous nous orientons vers des résultats comme un mode de vie urbain plus sain, des solutions plus créatives comme une infrastructure de transport actif et des carrefours de transit commencent à voir le jour.

10. RÉALISER UNE TRANSITION ÉQUITABLE

La réduction par le Canada de ses émissions à zéro entraînera inévitablement des changements dans l'économie. Ces changements doivent être gérés avec soin. Certains secteurs et certaines collectivités subiront des pertes d'emplois, tandis que le secteur de la technologie propre embauchera davantage. Pour s'assurer que la transition n'entraîne pas de difficultés, les gouvernements doivent soutenir de façon proactive les travailleurs et les collectivités vulnérables. Les décideurs publics doivent porter une attention particulière à la façon dont les mesures et les politiques figurant sur cette liste pourraient nuire aux femmes, aux jeunes, aux populations autochtones et minoritaires et aux Canadiens à faible revenu. La transition vers l'énergie propre peut être un moteur pour créer davantage d'emplois de qualité, investir dans la modernisation des emplois existants et réduire les inégalités.

Bien que les modèles et les experts s'entendent généralement sur le fait que ces dix stratégies et mesures seront des ingrédients importants pour accélérer la décarbonisation, le Canada n'est pas encore parvenu à un consensus sur les meilleurs moyens d'aller de l'avant.

Les efforts que déploie le Canada sont plus susceptibles de porter leurs fruits s'il existe une vision largement partagée d'un avenir écologique et sobre en carbone et de ses innombrables avantages pour la santé et la qualité de vie. Nous fournissons ce rapport pour mettre en lumière les éléments fondamentaux d'un avenir à zéro émission de carbone et les choix qui mettront le pays sur cette voie.



“ L'idée fausse la plus dangereuse au sujet de la crise climatique est peut-être celle selon laquelle nous devons réduire nos émissions, car c'est loin d'être suffisant. Nous devons arrêter nos émissions pour que le réchauffement climatique reste sous la barre de 1,5 ou 2 °C.

- Greta Thunberg

Crédit photo: Green Energy Futures

Introduction : les défis et occasions liés à l'atteinte de l'objectif zéro

Réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES)¹ du Canada à zéro d'ici le milieu du siècle représentera un défi, mais nous pouvons le relever.

Dans le présent rapport, nous présentons dix stratégies clés pour réduire à zéro, ou à presque zéro, les émissions canadiennes de GES d'ici le milieu du siècle. Ces stratégies comprennent notamment le nettoyage du secteur de l'électricité, l'électrification de domaines comme celui des transports et l'industrie, et l'utilisation judicieuse de l'énergie. Les stratégies qui figurent dans ce rapport se concentrent sur le Canada, mais elles s'avèrent pertinentes pour les régions et pays qui s'efforcent d'atteindre l'objectif zéro émission dans le monde entier.

Le présent rapport est motivé par le désir, d'une part, de susciter la prise de mesures efficaces par rapport au changement climatique et, d'autre part, d'améliorer l'information utilisée pour prendre des décisions en matière de politique publique qui façonnent l'économie et les émissions connexes. Le changement climatique met en danger les systèmes de survie de la planète et menace l'économie et la qualité de vie humaine². Une évaluation récente des retombées sur le Canada du changement climatique et des émissions de GES causés par les humains nous rappelle de façon brutale les changements à prévoir en fonction de différents degrés de réchauffement³. En effet, le Canada s'expose déjà à un réchauffement correspondant au double de la moyenne mondiale, le réchauffement dans le nord du Canada étant encore plus prononcé. On prévoit davantage d'événements climatiques extrêmes, dont plus d'inondations,

de sécheresses et d'incendies de forêt, ainsi que plus de précipitations sous forme de pluie, et moins de neige. Autour des côtes canadiennes, les océans sont plus chauds et acides, et leurs niveaux d'oxygène ont baissé, ce qui exerce de la pression sur la santé de l'écosystème marin.

Les économies peuvent et doivent être décarbonisées pour éviter des températures extrêmes, des risques sur le plan de la sécurité alimentaire, ainsi que d'autres dangers. La décarbonisation peut également stimuler l'innovation et créer des avantages économiques



Crédit photo : Green Energy Futures

Les économies peuvent et doivent être décarbonisées pour éviter des températures extrêmes, des risques sur le plan de la sécurité alimentaire, ainsi que d'autres dangers. La décarbonisation peut également stimuler l'innovation et créer des avantages économiques au fur et à mesure que les entreprises développent de nouvelles technologies dans les secteurs de l'énergie, des transports, de l'industrie et autres.

au fur et à mesure que les entreprises développent de nouvelles technologies dans les secteurs de l'énergie, des transports, de l'industrie et autres. La réduction de la dépendance à l'égard des combustibles fossiles permet également de réduire les dommages causés à l'air, à l'eau et au sol par les procédés d'extraction. Par ailleurs, une économie à zéro émission peut améliorer les résultats sur le plan de la santé et de la qualité de l'air, car les niveaux de pollution de l'air diminuent. La décarbonisation de l'économie canadienne constituera un défi exigeant un effort à tous les échelons de la société, mais elle représentera l'espoir d'un avenir meilleur. En outre, il est absolument nécessaire de respecter notre engagement dans le cadre de l'Accord de Paris consistant à « [contenir] l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels et [à poursuivre] l'action menée pour limiter l'élévation de la température à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels »⁴.

Les émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) – et plus précisément de CO₂ – associées au brûlage de combustibles fossiles, augmentent constamment depuis le début des années 1800, mais à un rythme particulièrement rapide depuis 2000. La température moyenne mondiale a déjà augmenté de presque 1 °C à cause des émissions humaines depuis l'ère préindustrielle. Le Canada a connu une hausse deux fois plus élevée que la moyenne mondiale, et elle a été particulièrement prononcée dans le nord du pays⁵. Les températures mondiales augmentent actuellement de 0,2 °C par décennie. Si cette augmentation n'est pas freinée bientôt, les tendances en matière d'émissions mondiales de CO₂ indiquent que cela pourrait provoquer des hausses de la température mondiale de 4 °C ou plus d'ici 2100, ce qui entraînerait des risques élevés pour le bien-être humain, selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) – organisme qui réunit et résume des preuves scientifiques de grande qualité examinées par des pairs et portant sur les aspects scientifique et économique du changement climatique.



Crédit photo: Green Energy Futures

Afin d'éviter une hausse des températures de plus de 2 °C, le GIEC signale que les émissions de CO₂ doivent diminuer de 25 % par rapport aux niveaux de 2010 d'ici 2030, et atteindre le seuil de zéro d'ici 2070. Le GIEC a récemment indiqué que les risques pour la santé, les moyens de subsistance, la sécurité et la prospérité économique sont considérablement plus grands si l'augmentation est de 2 °C, par rapport à 1,5 °C. Pour éviter une hausse des températures de plus de 1,5 °C, le GIEC souligne que les émissions de CO₂ doivent diminuer de 45 % par rapport aux niveaux de 2010 d'ici 2030, et atteindre le seuil de zéro d'ici 2050⁶. Les émissions du Canada ont atteint un sommet d'environ 750 mégatonnes d'équivalent CO₂ au milieu des années 2000, et elles ont diminué de 5 % pour atteindre 704 mégatonnes en 2016. S'élevant à 22 tonnes par année, les émissions canadiennes par personne sont parmi les plus élevées du monde.

HAUSSE LIMITE DE LA TEMPÉRATURE	ÉMISSIONS MONDIALES EN 2030	DÉLAI POUR ATTEINDRE LE SEUIL DE ZÉRO ÉMISSION
1,5 °C	45 % PLUS FAIBLES QUE LES NIVEAUX DE 2010	D'ICI 2050
2 °C	25 % PLUS FAIBLES QUE LES NIVEAUX DE 2010	D'ICI 2070

Autre problème : il ne faut pas seulement tenir compte du niveau des émissions, mais aussi des stocks de GES accumulés dans l'atmosphère. Pour ramener la concentration de GES dans l'atmosphère à un niveau qui éviterait le dépassement du seuil de 1,5 °C ou même de 2 °C, le GIEC prévoit que la mise en place à grande échelle de mesures d'élimination du CO₂ sera nécessaire. Or, l'élimination du CO₂ comporte beaucoup de risques et de facteurs inconnus⁷. Bien que nous reconnaissons l'existence de ce défi, dans le présent rapport, nous ne nous pencherons pas sur l'élimination du CO₂, mais plutôt sur la question urgente qui consiste à déterminer la façon dont les émissions peuvent être réduites à zéro d'ici 2050.

Dans ce rapport, nous examinons des modèles et des études qui explorent la décarbonisation profonde du Canada, que nous définissons comme une réduction de 80 % ou plus des émissions de GES d'ici 2050. L'objectif est de comprendre à quoi ressemblera l'avenir à zéro émission de carbone en 2050 et ce que nous devons faire pour y parvenir. Les études et modèles examinés figurent dans les références. Parmi les plus importants, on retrouve le Deep Decarbonization Pathways Project (DDPP), le projet Trottier pour l'avenir énergétique (PTAE) et les Perspectives énergétiques canadiennes (PEC). Nous nous concentrons particulièrement sur ces rapports, car ils fournissent une évaluation économique globale de la façon dont le Canada peut atteindre une décarbonisation profonde d'ici 2050. Malgré le fait que ces études affichent d'importantes différences méthodologiques quant au potentiel de décarbonisation profonde (et qu'elles ne tiennent pas compte de certains progrès technologiques importants au chapitre de l'énergie propre depuis que la modélisation a été entreprise), elles arrivent à la conclusion qu'une réduction de 70 % ou plus des émissions canadiennes d'ici 2050 est possible.

Notre rapport illustre que la tâche devant nous est à la fois difficile et remplie de promesses.



Ce que nous avons fait

Ce rapport porte sur la décarbonisation de la société canadienne d'ici 2050. Pour aborder cette question, nous avons :

- examiné les différents modèles, études et feuilles de route sur la décarbonisation pertinents pour comprendre comment décarboniser le Canada d'ici 2050;
- analysé les documents évalués par des pairs portant sur la décarbonisation, ainsi que des études équivalentes pour d'autres pays et le monde entier;
- évalué des projections établies par l'Agence internationale de l'énergie (AIE), l'International Renewable Energy Agency (IRENA), Shell et le GIEC relativement à l'utilisation de l'énergie et au déploiement d'énergies renouvelables et de technologies propres;
- résumé nos observations dans une liste des dix principales stratégies pour parvenir à l'« objectif zéro » et atteindre une réduction importante des émissions de GES au Canada.

Il est à noter que notre analyse porte sur le système énergétique et n'aborde pas les émissions provenant de l'agriculture, des déchets, des changements d'utilisation du sol et de la foresterie⁸. Pour que le Canada respecte ses engagements climatiques, des mesures devront être prises à l'égard de ces émissions également, et les écosystèmes canadiens devront être gérés de façon à maintenir ou à renforcer les stocks de carbone dans le sol et la végétation. Toutefois, ces importantes questions dépassent la portée de ce rapport. Par ailleurs, si nous reconnaissons que les intérêts économiques et politiques ont eu des répercussions sur les politiques énergétiques et climatiques antérieures, nous ne nous penchons pas sur

l'aspect politique de l'action climatique au Canada ni sur la faisabilité relative de gestes divers. Nous n'abordons pas non plus le besoin d'éliminer les émissions de GES associées aux marchandises importées, même si elles peuvent être importantes compte tenu de la production à fortes émissions de carbone dans de nombreux pays⁹.

Le tableau A1 de l'annexe donne une vue d'ensemble des études ou modèles relatifs à la décarbonisation que nous avons examinés.

Dans les pages qui suivent, nous décrivons dix stratégies pour atteindre l'objectif de zéro émission au Canada. Nous sommes convaincus de l'utilité de ces stratégies, car nous avons remarqué une convergence à leur sujet dans les études de modélisation et les documents sur la décarbonisation qui indique qu'elles sont essentielles pour réduire les émissions à zéro.

Après la présentation des stratégies, nous abordons les répercussions de ces constatations et formulons nos recommandations pour atteindre l'objectif de zéro émission au Canada.



Crédit photo: Thomas Kolnowski



Photo: National Renewable Energy Lab via Flickr.

ENCADRÉ 1 POURQUOI UTILISER DES MODÈLES POUR COMPRENDRE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE?

La modélisation offre bien des avantages en vue de déceler la voie la plus rentable vers une économie à zéro émission pour l'avenir. Bon nombre des politiques que les gouvernements peuvent élaborer ou des mesures que les municipalités, les entreprises et les propriétaires peuvent prendre pour réduire les émissions nécessitent un investissement considérable de temps et de ressources. Or, ces mesures n'ont pas toute la même efficacité. La modélisation nous permet d'évaluer l'efficacité de différentes politiques avant que les municipalités, les entreprises ou les ménages apportent des modifications ou investissent dans de nouvelles technologies. En partant de l'objectif visé – une économie à zéro émission en 2050 –, nous pouvons explorer les politiques qui peuvent nous y mener, le rythme auquel elles doivent être mises en œuvre, de même que les investissements requis.

Les modèles ont leurs limites et chaque modèle comporte des forces et des faiblesses. Au moment d'analyser différents scénarios à faibles émissions en carbone, les modélisateurs sont conscients qu'il est difficile de prévoir les innovations technologiques futures. En effet, on ne sait pas encore quelles technologies de stockage d'énergie prévaudront en 2050, quel rôle les véhicules à pile à combustible joueront dans le secteur canadien du transport de longue distance, ou de quelle façon seront atténuées les émissions liées à la circulation aérienne. Tandis que des billions de dollars sont investis dans les technologies propres dans le monde entier, de nouvelles technologies verront le jour, et cette évolution technologique ainsi que ses coûts sont difficiles à prévoir et à représenter sous la forme de modèles. En outre, une incertitude considérable entoure l'évolution du milieu urbain à mesure que les véhicules autonomes deviendront plus répandus. Par ailleurs, les modèles affichent des limites au moment de représenter la façon dont les valeurs, les priorités et les styles de vie évolueront au fil du temps : p. ex., il est difficile de déterminer dans quelle mesure le travail évoluera en fonction de l'automatisation, et quelles seront les répercussions de cette évolution sur l'énergie utilisée pour aller au travail et en revenir. Ainsi, même s'ils peuvent donner des indices sur de futures directions possibles, les résultats des modèles doivent être interprétés avec soin. Ces résultats n'ont pas pour but de prédire l'avenir, particulièrement étant donné

que le futur dépendra en partie des décisions en matière de politiques et d'investissements que nous prendrons au cours des prochaines années. En résumant plusieurs modèles, il est possible de déceler des conclusions communes, ce qui renforce notre confiance en leur validité.

À l'instar des modèles sur lesquels il se base, ce rapport ne vise pas à prévoir ou à déterminer quelles technologies particulières à faibles émissions en carbone seront déployées. Au lieu de cela, la modélisation peut constituer la base d'un plan détaillé et crédible en matière d'énergie renouvelable visant à assurer le respect des engagements du Canada dans le cadre de l'Accord de Paris et à soutenir le Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques. La modélisation nous permet de répondre aux questions « Que se passe-t-il si...? » et de comparer différentes configurations d'un système d'énergie propre, p. ex., comparer deux scénarios, le premier reposant davantage sur l'énergie éolienne et l'efficacité énergétique, et le deuxième, sur la bioénergie et l'énergie solaire. La modélisation peut aussi aider les municipalités à atteindre leurs objectifs en matière d'énergie renouvelable.

.....



Credit photo : Green Energy Futures

10

stratégies pour
réduire de façon
importante les
émissions de GES

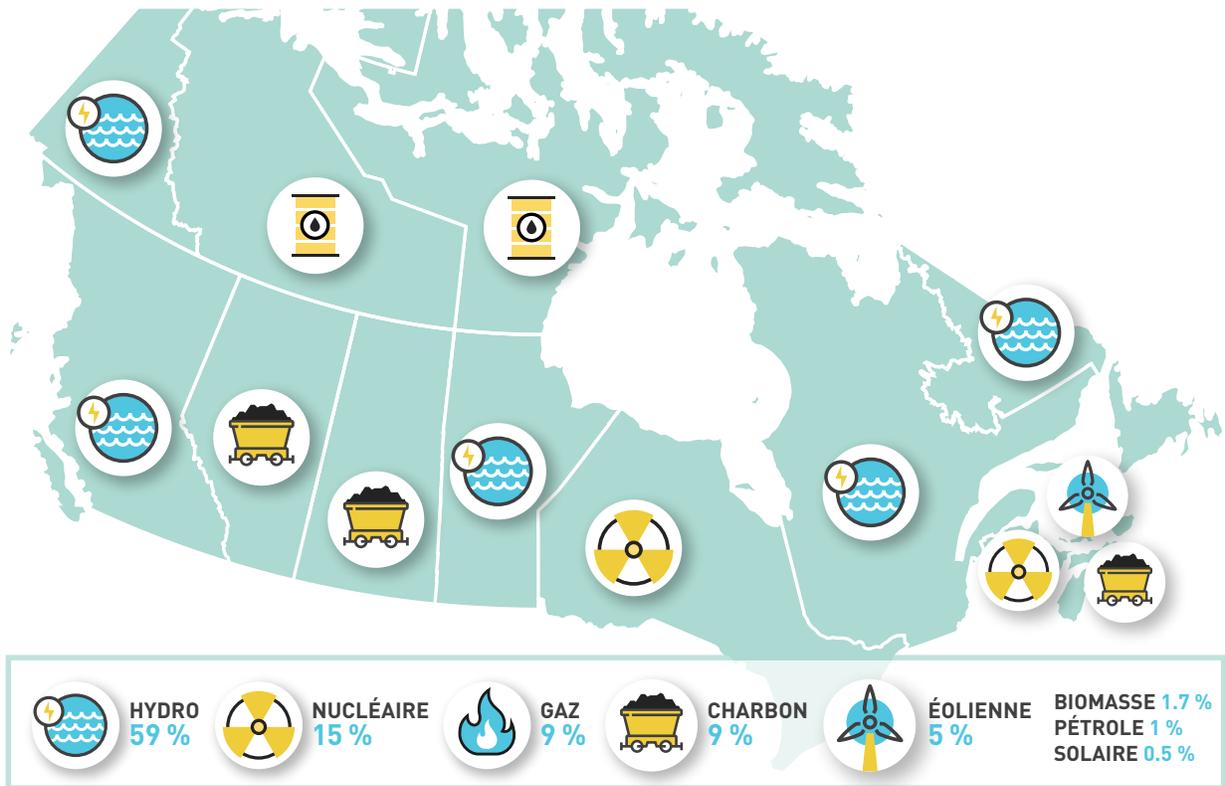


Accélérer la transition vers l'énergie propre

« Le Canada a la chance de pouvoir décarboniser assez rapidement sa chaîne d'approvisionnement en électricité »
(PTAE, p. 280) [traduction libre]

Le Canada a fait beaucoup de progrès au chapitre de la réduction des émissions du secteur de l'électricité au cours des deux dernières décennies, de sorte qu'il figure parmi les plus propres du monde. Près de 60 % de l'électricité canadienne est générée dans des centrales hydroélectriques, tandis que l'énergie éolienne représente près de 2 % du total, et cette ressource prend de l'ampleur. Des provinces comme la Colombie-Britannique, le Manitoba, le Québec et Terre-Neuve-et-Labrador utilisent leurs centrales hydroélectriques pour fournir de l'électricité à faibles émissions de carbone aux foyers et aux entreprises¹⁰. De leur côté, l'Ontario et le Nouveau-Brunswick font aussi appel à des centrales nucléaires¹¹.

Principale source d'électricité dans chaque province et territoire :





Crédit photo: Patricia Lightburn

Il reste du travail à accomplir pour en arriver à un secteur de l'électricité à zéro émission au Canada. En effet, l'Alberta, la Saskatchewan, le Nouveau-Brunswick et la Nouvelle-Écosse emploient toujours du charbon pour générer de l'électricité. De plus, ensemble, l'Alberta, la Saskatchewan et l'Ontario produisent presque 90 % de l'électricité générée au moyen de gaz naturel au Canada, et l'on continue de construire de nouvelles usines de traitement de gaz naturel. Même compte tenu des politiques climatiques proposées ou en vigueur, y compris la réglementation fédérale qui exige que les centrales au charbon soient fermées ou équipées d'unités de capture et stockage de carbone d'ici 2030, le Canada doit mettre l'accent sur l'électricité propre au moyen de politiques additionnelles pour rester sur la voie lui permettant de tenir son engagement consistant à faire en sorte que 90 % de son électricité provienne de sources à zéro émission d'ici 2030¹².

Réduire à zéro les émissions de GES du secteur de l'électricité sera essentiel pour atteindre l'objectif de décarbonisation profonde au Canada. Il existe des chemins concurrents quant à la façon dont le Canada pourrait nettoyer le secteur de l'électricité.

- Le rapport du **projet Trottier pour l'avenir énergétique (PTAE)** expose des scénarios futurs reposant sur une vaste expansion des centrales hydroélectriques et nucléaires.
- Le **Deep Decarbonization Pathways Project (DDPP)** présente un avenir où des sources d'énergie renouvelable, notamment éolienne et solaire, joueraient un rôle plus important sur le plan de la génération d'électricité. Le modèle du DDPP suppose que les technologies de capture et stockage de carbone seront viables du point de vue commercial et technique. Ces technologies permettent de capter les émissions de CO₂ générées par la production d'électricité au moyen de gaz naturel et de les stocker sous terre. Le scénario de production d'électricité du DDPP comprend un déploiement à grande échelle de systèmes de capture et stockage de carbone en Alberta.

- Selon le rapport *Agir sur les changements climatiques* de l'initiative **Dialogues pour un Canada vert**, l'exploitation des abondantes ressources d'énergie renouvelable du pays pourrait aider le Canada à produire 100 % de son électricité à partir de sources à faibles émissions en carbone d'ici 2035.
- Le scénario de réduction de 80 % des émissions présenté dans les **Perspectives énergétiques canadiennes** repose, d'une part, sur une forte croissance dans la production de biocarburant et d'énergie renouvelable et, d'autre part, sur un ralentissement progressif dans la production de combustibles fossiles. Les gains d'efficacité découlant d'une électrification à grande échelle entraîneront une lente croissance de la production globale d'énergie, et ce malgré la croissance économique et démographique. D'ici 2050, le secteur éolien devrait générer plus d'électricité que le secteur hydroélectrique, et l'énergie solaire devrait produire plus d'électricité que le secteur nucléaire.

On assiste actuellement à un débat animé pour déterminer si les énergies renouvelables (énergie éolienne et solaire et petits projets hydroélectriques) seront en mesure de remplacer les combustibles fossiles et les centrales nucléaires actuels, ou si de grandes centrales nucléaires, hydroélectriques ou alimentées au moyen de combustibles fossiles et équipées de systèmes de capture et stockage de carbone seront requises pour que le secteur de l'électricité atteigne l'objectif de zéro émission de GES (se reporter à l'encadré 2).

.....

ENCADRÉ 2 UN SECTEUR ÉLECTRIQUE ENTIÈREMENT ALIMENTÉ PAR L'ÉNERGIE ÉOLIENNE, SOLAIRE ET HYDROÉLECTRIQUE EST-IL POSSIBLE?

Le professeur Mark Jacobson de l'Université Stanford et plusieurs de ses collaborateurs ont rédigé plusieurs études présentant des chemins vers un avenir 100 % axé sur l'énergie renouvelable¹³. Ces études envisagent une électrification généralisée de l'industrie et des systèmes de chauffage et de transport, des gains importants au chapitre de l'efficacité énergétique, ainsi qu'une combinaison énergétique faisant appel au vent de mer et de terre, à des panneaux solaires photovoltaïques, à des capteurs solaires thermiques, de même qu'à l'énergie géothermique, marémotrice et hydroélectrique. Dans ces scénarios, les combustibles fossiles et les centrales nucléaires ne sont plus requis. Par ailleurs, dans une étude de 2012, le National Renewable Energy Laboratory a démontré qu'il est possible du point de vue technique de satisfaire 80 % des besoins en électricité des États-Unis au moyen d'énergie renouvelable d'ici 2050, ce qui est une source d'espoir quant à un avenir renouvelable¹⁴.

Les critiques des scénarios 100 % axés sur l'énergie renouvelable portent surtout sur la capacité de sources variables d'énergie renouvelable de satisfaire la demande de façon fiable, le coût de scénarios entièrement renouvelables par rapport à des scénarios faisant appel à l'énergie nucléaire et aux technologies de capture et stockage de carbone, la faisabilité

de la construction d'infrastructures de stockage d'énergie suffisantes pour assurer un approvisionnement fiable en énergie, la faisabilité du passage à un système reposant sur du combustible liquide à base d'hydrogène, le manque de précisions spatiales dans les modèles employés pour créer les scénarios, et le caractère réalisable des gains rapides présumés sur le plan de l'efficacité énergétique¹⁵. Il reste encore à déterminer si un scénario 100 % renouvelable pourra assurer l'approvisionnement électrique du Canada – et à quel coût – dans un contexte où la demande aura augmenté de façon substantielle d'ici 2050 compte tenu de l'électrification de l'économie.



Crédit photo: Patricia Lightburn

Dans le contexte canadien, le PTAE et le DDPP supposent un mélange de sources d'électricité dépassant les énergies renouvelables à elles seules. De son côté, le rapport du PTAE a montré que des réductions importantes des émissions peuvent être réalisées à un coût semblable avec ou sans le recours à l'énergie nucléaire. Selon des études de General Electric¹⁶ et de Dolter & Rivers¹⁷, l'énergie éolienne pourrait fournir de 30 à 35 % de l'électricité canadienne à moyen terme. En outre, grâce à de nouvelles lignes de transport d'électricité interprovinciales, les réservoirs hydroélectriques peuvent jouer le rôle de batteries et aider à équilibrer l'approvisionnement variable en énergie éolienne¹⁸. L'utilité de ces nouvelles lignes de transport d'électricité interprovinciales est explorée dans les études de Ressources naturelles Canada réalisées dans le cadre de l'Initiative de collaboration régionale et d'infrastructure stratégique de l'électricité¹⁹, ainsi que dans les travaux de modélisation qui cherchaient à renforcer les liens entre Hydro-Québec et le nord-est des États-Unis²⁰. Toutefois, il est à noter qu'aucune étude n'a entièrement examiné le potentiel coût-efficacité de la génération d'énergie renouvelable en tenant compte de

l'ensemble des options disponibles en matière de transport d'électricité et de technologies de stockage d'énergie.

Une autre question soulevée quant à la viabilité de l'utilisation accrue d'énergies renouvelables vise la mesure dans laquelle les investissements énergétiques requis pour produire de l'énergie renouvelable (solaire, éolienne ou autre) rapporteront par l'entremise de l'électricité générée²¹. Le ratio de rendement sur l'énergie investie (RREI) est un indicateur employé pour mesurer le gain en énergie net. Il est calculé en divisant l'énergie produite par une source d'énergie par l'énergie requise dans le cadre des activités d'extraction, de construction et d'exploitation associées à cette source d'énergie. Un RREI de 1:1 ou moins indique que l'investissement est futile du point de vue énergétique : il génère une quantité d'énergie égale à celle qui est utilisée pour produire cette énergie, en d'autres mots, aucun surplus énergétique n'est généré aux fins d'utilisation. Historiquement, le RREI du secteur du pétrole classique était relativement élevé – environ 30:1 –, mais il a diminué au fil de l'épuisement des meilleurs champs pétrolifères. Particulièrement au début de l'exploitation de l'énergie solaire et éolienne, on redoutait qu'un RREI faible rende inutile le passage aux énergies renouvelables,

compte tenu de leur incapacité à satisfaire les besoins énergétiques de la société. Or, à mesure que la production d'énergie renouvelable a augmenté, les avancées technologiques ont fait diminuer à la fois les répercussions environnementales par unité et les investissements énergétiques requis²². Des recherches récentes suggèrent que les projets éoliens peuvent atteindre un RREI de 30:1 ou plus²³, et même en Suisse, où l'ensoleillement est modéré, le RREI de l'énergie solaire est de 9:1²⁴. Même ce résultat offre une comparaison favorable relativement aux sables bitumineux canadiens, qui affichent un RREI de 5:1 ou moins²⁵. Pour compliquer encore plus la situation, pour ce qui est de la plupart des usages finaux, les combustibles fossiles entraînent une perte par conversion énergétique élevée (c'est-à-dire une faible transformation de l'énergie en essence pour déplacer le véhicule), tandis que l'électricité offre un taux d'efficacité élevé au chapitre de l'usage final (en d'autres mots, un taux de conversion élevé de l'énergie emmagasinée dans la batterie pour déplacer le véhicule). D'après une analyse de la génération d'électricité au Royaume-Uni, les RREI de la biomasse et du pétrole sont de 3,1:1 et de 4,8:1 respectivement, tandis que celui de l'énergie solaire va de 10:1 à 25:1, et que celui de l'énergie éolienne s'élève à 50:1, ce qui laisse entendre qu'une transition vers l'énergie renouvelable est possible, au détriment des combustibles fossiles²⁶. Au fur et à mesure que les technologies solaire et éolienne continuent d'avancer et que leur déploiement se poursuit, de nouvelles améliorations au chapitre du RREI pourraient être possibles. Or, une tendance inverse pointe à l'horizon : en effet, avec l'épuisement graduel des meilleurs sites d'exploitation d'énergie solaire et éolienne, il faudra se tourner vers des lieux de moins bonne qualité pour augmenter la capacité à cet égard. Par ailleurs, compte tenu des limites au chapitre de l'empreinte carbone, il est essentiel qu'une partie de cette empreinte soit mise de côté pour tenir compte des émissions associées à la mise en place de la capacité de génération d'énergie renouvelable dans les économies qui doivent encore être décarbonisées²⁷.

.....

Certaines études suggèrent une plus vaste distribution d'énergie renouvelable dans le cadre de laquelle les foyers et les entreprises installeraient des panneaux photovoltaïques sur les toits et des systèmes de stockage d'énergie, en plus d'adopter des technologies de prochaine génération, comme des appareils électroménagers intelligents. De telles mesures pourraient transformer le secteur de l'électricité, car bien des ménages et des entreprises cherchent à produire eux-mêmes une part plus importante de leur électricité et à réduire leur dépendance à l'endroit des services publics.

Même si les études donnent moins de certitudes à savoir si le Canada utilisera plus – ou moins – d'énergie dans un avenir où les émissions de carbone seront proches de zéro, elles soulignent toutes qu'une quantité beaucoup plus importante d'électricité propre sera requise (se reporter à la stratégie 3)²⁸. Par exemple, le DDPP prévoit qu'une économie à faibles émissions en carbone nécessitera une production d'électricité 2,5 fois plus élevée d'ici 2050, tandis que le PTAE estime que 3 fois plus d'électricité sera requise. De plus, le coût associé à ce nouvel approvisionnement en électricité doit être bas pour assurer la viabilité économique de l'utilisation de l'électricité et de l'hydrogène pour décarboniser le secteur²⁹.

ENCADRÉ 2B MODÉLISATION FUTURE DE L'INTÉGRATION DE L'ÉNERGIE RENOUVELABLE DANS LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE CANADIEN

Les recherches sont concluantes : une plus grande quantité d'électricité propre sera requise pour assurer un avenir à faibles émissions en carbone (se reporter à la stratégie 1). Le Canada dispose d'abondantes ressources d'énergie renouvelable et d'importants réservoirs hydroélectriques qui offrent un potentiel élevé d'entreposage d'énergie et de distribution en temps opportun. De plus, les gens du secteur de l'énergie sont des champions de l'ingéniosité. Or, malgré ces avantages, il reste d'importantes questions à régler, des questions ayant des retombées sur le rôle que les énergies renouvelables peuvent jouer pour faire progresser l'électrification, satisfaire les besoins d'énergie au pays et atteindre ses objectifs climatiques :

- Quand et où la capacité de génération d'électricité est-elle requise?
- De quelle source d'énergie à zéro émission faut-il tirer parti?
- Comment le système actuel peut-il être optimisé pour accélérer la transition?
- Quels investissements futurs sont requis au chapitre du stockage et du transport d'électricité?
- Quel rôle peut jouer la génération d'électricité assortie de capacités de capture et stockage de carbone?
- Quelles sont les technologies précommerciales les plus prometteuses?
- L'efficacité énergétique, d'une part, et de nouveaux modèles d'affaires proposant des approches novatrices pour satisfaire les besoins de services énergétiques, d'autre part, peuvent-ils nous aider à réduire de façon marquée notre appétit en énergie?
- Quelles sont les économies d'énergie potentielles générées par l'application de principes de croissance intelligente au moment de planifier nos collectivités?
- Comment l'énergie nécessaire pour aller au travail et en revenir évoluera-t-elle à mesure que les véhicules autonomes deviendront plus courants et que le milieu professionnel s'adaptera à une automatisation accrue?
- Quelles pourraient être les limites imposées par les valeurs sociales et environnementales relativement à l'ensemble de solutions optimales du point de vue technologique et économique?

Des efforts accrus pour améliorer la modélisation des systèmes énergétiques canadiens à tous les échelons, du municipal au national, aideraient le Canada à avancer vers un avenir à zéro émission, en plus de favoriser l'optimisation des investissements en infrastructure.



Crédit photo: Patricia Lightburn

2



Faire plus avec moins d'énergie

« La première option devrait toujours être de réduire l'utilisation d'énergie, et particulièrement de combustibles fossiles. » (PTAE, p. 280) [traduction libre]

Dans sa stratégie visant l'horizon du milieu du siècle, le gouvernement du Canada présente l'efficacité énergétique comme étant le « premier carburant »³⁰, et le DDPP présente aussi l'efficacité énergétique comme l'un des trois piliers de la décarbonisation. L'efficacité énergétique désigne le fait de fournir les mêmes services énergétiques en utilisant moins d'énergie. C'est une stratégie qui peut être déployée dans chaque secteur de l'économie canadienne pour obtenir des économies mesurables. Les investissements dans des mesures d'efficacité énergétique présentés dans le Cadre pancanadien permettraient aux consommateurs du pays d'économiser quelque 1,4 milliard de dollars (soit 144 \$ par année pour le ménage moyen), tandis que les entreprises, l'industrie et les institutions économiseraient 3,2 milliards de dollars par année³¹.

L'économie mondiale devient plus écoénergétique à un rythme de 1,8 % par année, mais ce résultat est très insuffisant pour atteindre les objectifs climatiques³², et ces gains sont plus qu'annulés par un taux de croissance du PIB mondial de 2,9 % en moyenne pour la période 2000-2017³³. L'Agence internationale de l'énergie a lancé un appel pour faire passer le rythme d'amélioration écoénergétique à 2,6 % par année pour atteindre les cibles établies dans le cadre de l'Accord de Paris pour 2030³⁴. Selon le Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C, les investissements annuels au chapitre des technologies à faibles émissions en carbone et de l'efficacité énergétique doivent être multipliés par six par rapport aux niveaux de 2015³⁵.

Au Canada, l'efficacité énergétique des nouveaux bâtiments peut être améliorée au moyen de la conception de bâtiment solaire passif, du renforcement de l'isolation et de l'utilisation de thermopompes et de thermostats intelligents³⁶. Par exemple, la norme Passivhaus – élaborée en Allemagne d'après des recherches d'avant-garde

« L'efficacité énergétique pourrait fournir plus de 40 % de la réduction requise d'ici 2040 pour être conforme à l'Accord de Paris. »
- Agence internationale de l'énergie



Les bâtiments écoénergétiques sont beaucoup plus confortables pour les occupants, car les courants d'air sont éliminés, la qualité de l'air est améliorée et le bruit de la rue est réduit.

Crédit photo: Green Energy Futures

menées en Saskatchewan dans les années 1970 – réduit la demande d'énergie de jusqu'à 90 % par rapport aux techniques de construction conventionnelles. De plus, la conception de bâtiments à consommation énergétique nette zéro qui intègrent des panneaux solaires photovoltaïques peut faire en sorte que les ménages et les bâtiments génèrent plus d'énergie qu'ils n'en consomment. En outre, les bâtiments actuels doivent subir des rénovations énergétiques approfondies afin d'améliorer leur rendement globalement faible en cette matière. Par ailleurs, les permis délivrés pour la réalisation de rénovations majeures pourraient contenir des exigences d'efficacité énergétique favorisant des réductions importantes des émissions³⁷.

Les bâtiments écoénergétiques sont beaucoup plus confortables pour les occupants, car les courants d'air sont éliminés, la qualité de l'air est améliorée et le bruit de la rue est réduit. En général, les investissements réalisés au titre de l'efficacité énergétique permettent aux gouvernements, aux entreprises et aux ménages d'économiser en réduisant le coût de l'énergie et, dans bien des cas, le temps de récupération de l'investissement est de moins de cinq ans³⁸.

L'intensité énergétique de l'économie est un indicateur de la quantité d'énergie requise pour produire un montant précis du PIB (utilisation principale de l'énergie par dollar de PIB). Ainsi, une économie à faible intensité énergétique est plus efficace au moment de transformer l'énergie en PIB. De 1995 à 2010, l'intensité énergétique de l'économie canadienne s'est améliorée de 23 %³⁹. Près de la moitié de cette amélioration a été attribuable à des changements structurels de l'économie : on s'est tourné vers des activités affichant à la fois une valeur ajoutée élevée et de faibles émissions en carbone. Par exemple, l'industrie lourde



Crédit photo: Green Energy Futures

a été délaissée au profit des secteurs des finances et de la santé. Seul environ un cinquième de cette amélioration a été attribuable à des améliorations réelles de l'efficacité énergétique au sein d'un secteur.

Selon seize études internationales sur les voies menant à une décarbonisation profonde, en moyenne, « l'intensité énergétique de l'économie chutera de 65 % de 2010 à 2050 » dans des scénarios où une décarbonisation profonde sera atteinte⁴⁰. Ces données concordent avec une évaluation plus récente selon laquelle l'intensité énergétique de l'économie mondiale doit diminuer de 75 % de 2015 à 2050 pour respecter le scénario de réchauffement planétaire de 1,5 °C⁴¹. Ces résultats démontrent que l'efficacité énergétique peut jouer un rôle important pour diminuer l'intensité énergétique de l'économie et, ainsi, réduire la quantité d'énergie propre nécessaire pour atteindre nos objectifs de décarbonisation.

Une utilisation accrue de matières entraîne aussi une augmentation de l'utilisation d'énergie. De 1900 à 2015, l'extraction humaine de matières s'est multipliée par 12 et, si aucun changement de cap n'est amorcé, elle devrait encore se multiplier par 2,5 d'ici 2050⁴². L'extraction et le traitement de matières premières, la fabrication de biens et la construction d'infrastructures nécessitent de l'énergie et génèrent des émissions polluantes⁴³. On estime que 8 % de l'énergie utilisée à l'échelle mondiale vise la production primaire de métaux⁴⁴, et l'énergie requise pour les extraire devrait augmenter à mesure que les gisements de meilleure qualité s'épuisent⁴⁵. L'abandon du modèle linéaire actuel de l'économie du « gaspillage » au profit de l'économie circulaire est de plus en plus reconnu comme une stratégie permettant de réduire les besoins énergétiques pour alimenter l'économie et obtenir rapidement les réductions des émissions recommandées par le GIEC⁴⁶. L'économie circulaire est basée sur la diminution au minimum de l'apport en ressources et de la production de déchets, en réduisant l'accent mis sur la consommation et en privilégiant les concepts de durabilité, de réparation, de réutilisation et de recyclage. Quand les administrations, les entreprises et les institutions canadiennes améliorent leur efficacité sur le plan de l'utilisation des matières, elles favorisent une utilisation efficace de l'énergie⁴⁷.

3



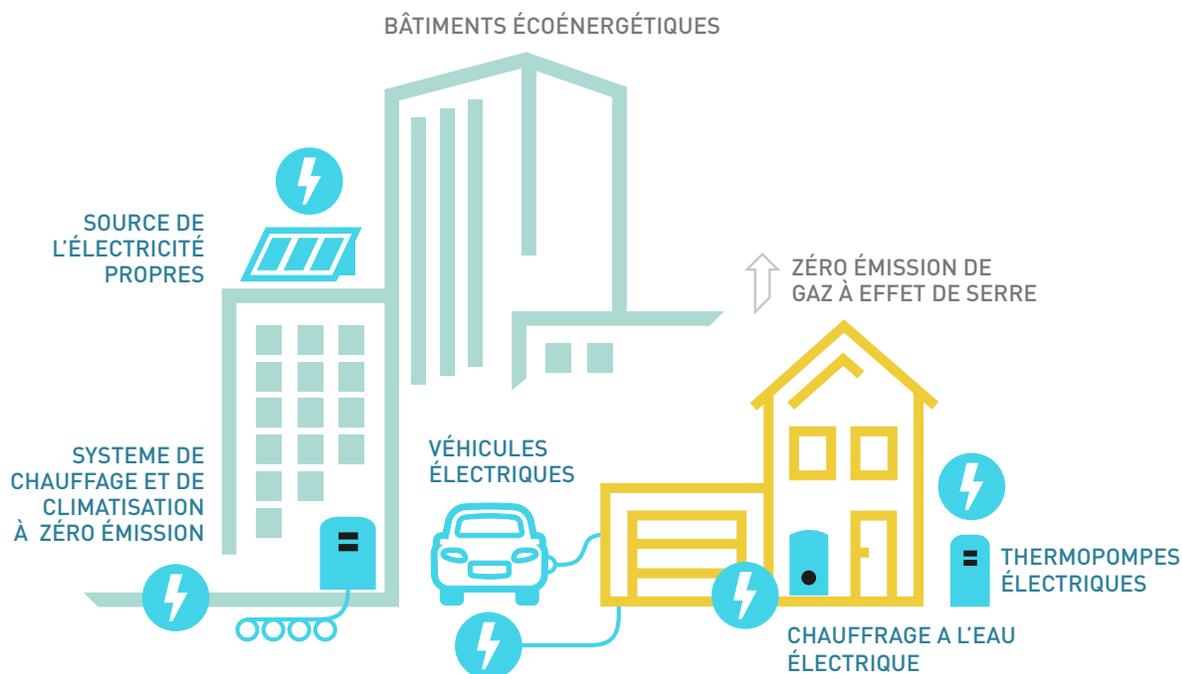
Électrifier presque tout

« Le remplacement des énergies fossiles par de l'électricité de source renouvelable est le chemin le plus efficace vers une diminution marquée des émissions à l'échelle mondiale. »

– DDPP, p. 24 [traduction libre]

L'électricité est notre source d'énergie la plus propre, mais en 2016 elle ne représentait que 20 % de l'approvisionnement canadien en énergie⁴⁸.

Le nettoyage et la décarbonisation graduelle de la chaîne d'approvisionnement en électricité nous permettront d'alimenter une plus grande part de l'économie au moyen d'électricité propre. Dans le secteur de la construction, nous pouvons remplacer les fournaies et chaudières au gaz naturel par des thermopompes électriques. Dans le secteur des transports, nous pouvons abandonner les moteurs à combustion au profit de moteurs électriques. Pour fournir la chaleur et la vapeur requises par ses procédés, le secteur industriel peut remplacer la cogénération à base de gaz naturel par des chaudières électriques et des thermopompes. Dans le secteur de l'acier, on peut adopter des méthodes de production basées sur l'arc électrique. Les émissions du secteur des sables bitumineux peuvent être réduites en utilisant de l'électricité pour produire de l'oxygène aux fins d'extraction à la vapeur par contact direct. Selon l'Institut canadien de recherche énergétique, l'électrification des secteurs résidentiel et commercial⁴⁹ (en excluant le secteur industriel) et du transport routier de voyageurs peut réduire les émissions de GES de 13 % et de 35 % sous les niveaux de 2005, dans le Canada atlantique et au Québec, respectivement, d'ici 2050⁵⁰.



Les hypothèses présentées dans les rapports du PTAE et du DDPP supposent une électrification majeure. Dans les scénarios du PTAE, la proportion de l'électricité sur le plan de l'approvisionnement total en énergie passerait de 22 % actuellement à 53 % ou 55 % en 2050. Dans les scénarios du DDPP, l'électricité représenterait 43 % de l'approvisionnement total en énergie d'ici 2050. Dans les scénarios du DDPP, on présume que d'ici les années 2030, les combustibles fossiles seront exclus comme source de chaleur pour les nouveaux bâtiments, et que la plupart des besoins en chauffage de ces bâtiments à haute efficacité énergétique seront comblés par des thermopompes électriques ou des appareils de chauffage à résistance électrique, tandis que l'utilisation de chauffe-eau solaires et de systèmes énergétiques collectifs sera limitée. La part de marché des chaudières électriques industrielles sera de 40 % en 2050, ce qui représente une hausse majeure par rapport aux 7 % actuels. Les scénarios du DDPP supposent également que pratiquement toute l'énergie des véhicules de promenade légers peut être électrique d'ici 2050.

L'électrification contribuerait également à faire plus avec moins d'énergie (se reporter à la stratégie 2). Les meilleurs moteurs à combustion interne offerts aujourd'hui affichent un taux d'efficacité d'environ 38 % sur le plan de la transformation de l'énergie en mouvement, et la majorité de l'énergie est perdue sous la forme de chaleur du moteur. Alors que les technologies avancées des moteurs peuvent aider à réduire cette perte d'énergie, les lois de la thermodynamique imposent un plafond à l'efficacité énergétique des moteurs à combustion, limitant la marge quant à l'amélioration future de l'efficacité des voitures à essence et diesel⁵¹. De leur côté, les moteurs électriques affichent un taux d'efficacité allant de 85 % à 98 % sur le plan de la transformation de l'énergie en mouvement : ainsi, les véhicules électriques à batterie peuvent transformer de 65 % à 70 % de l'énergie de la batterie en mouvement si l'on tient compte des autres utilisations de l'énergie à bord⁵². Un tel taux d'efficacité signifie que le passage aux véhicules électriques pourrait réduire de 70 % l'énergie requise par passager-kilomètre d'ici 2050 (DDPP, p. 30). De plus, les gains d'efficacité découlant de l'électrification vont bien au-delà des véhicules : mentionnons par exemple les moteurs électriques et les thermopompes dans le secteur industriel.

Le défi posé par les changements climatiques peut sembler insurmontable, mais des études mettent en lumière les nombreuses options et solutions disponibles pour atteindre nos objectifs.



Crédit photo: Green Energy Futures

ENCADRÉ 3 COMMENT INTÉGRER PLUS D'ÉNERGIES RENEUVELABLES

Les combustibles fossiles sont parvenus à dominer l'économie en grande partie car ils offrent une forme concentrée d'énergie qui peut être transportée, stockée et utilisée de façon très souple. Ceux qui se montrent sceptiques au sujet de l'énergie renouvelable signalent à l'occasion, d'une part, que le soleil n'est parfois pas visible et que le vent ne souffle pas toujours et, d'autre part, que les hôpitaux, les ménages et les usines ont besoin d'un approvisionnement fiable en électricité. À mesure que les combustibles fossiles sont délaissés au profit des énergies renouvelables, il faut se pencher sur la question du stockage de l'énergie. En investissant en une combinaison de plusieurs facteurs – stockage d'énergie, réaction de la demande, réseaux électriques intelligents et expansion des systèmes de transport et de distribution d'électricité –, le Canada pourra utiliser plus d'énergie renouvelable tout en assurant un approvisionnement fiable en électricité.

STOCKAGE D'ÉNERGIE

Il existe de nombreux moyens de stockage d'énergie à zéro émission : barrages hydroélectriques, énergie stockée par pompage (nécessite deux réservoirs d'eau à hauteurs différentes), batteries aux ions de lithium adaptées aux réseaux électriques et technologies émergentes en matière de batteries, air comprimé, énergie potentielle gravitationnelle (soulever une charge), stockage d'énergie cinétique (p. ex., volant d'inertie) et transformation d'électricité en gaz (utiliser de l'électricité pour produire de l'hydrogène ou un autre gaz pouvant ensuite alimenter une pile à combustible ou un générateur afin de produire de l'électricité à nouveau). Le Canada est bien placé sur le plan de l'intégration d'énergies renouvelables, car il compte de nombreux barrages hydroélectriques d'envergure pouvant jouer le rôle de batteries géantes. Pour mettre en contexte l'ampleur et la valeur stratégique de ces réservoirs destinés à la décarbonisation, si les plus grandes batteries aux ions de lithium adaptées aux réseaux électriques actuellement fabriquées sont conçues pour stocker assez d'énergie en vue de générer de 100 à 1 000 MW sur une période pouvant aller jusqu'à quatre heures, à lui seul, le réservoir Williston, situé en Colombie-Britannique, pourrait théoriquement fournir 2700 MW de façon continue pendant six mois⁵³.

Moins coûteux, des systèmes mettant à profit des panneaux solaires photovoltaïques et des capacités de stockage remplacent les centrales de pointe au gaz dans les marchés américain et australien, ce qui accroît le potentiel de l'énergie solaire pour contribuer à satisfaire la demande de pointe du soir, même après le coucher du soleil⁵⁴

EXPANSION DU SYSTÈME DE TRANSPORT D'ÉLECTRICITÉ

Le Canada est un pays vaste aux paysages diversifiés; ainsi, dans une situation où les régions sont interreliées au moyen d'un système de transport d'électricité élargi, si une région génère un surplus d'électricité, cette énergie peut être acheminée à une autre région où les extrants énergétiques sont bas à cause de vents faibles ou de ciels gris⁵⁵. En tirant parti de régions offrant des ressources éoliennes, solaires ou au fil de l'eau à valeur élevée pour augmenter la capacité du système de transport d'électricité, il sera possible de lancer un plus grand nombre de projets renouvelables en vue de produire de l'électricité propre. Selon des évaluations récentes, le renforcement des systèmes de transport d'électricité à l'échelle régionale permettrait de faire un plus grand usage de l'électricité provenant de sources renouvelables et aiderait à limiter les coûts⁵⁶.

TARIFICATION, RÉACTION DE LA DEMANDE ET RÉSEAUX ÉLECTRIQUES INTELLIGENTS

Les mécanismes de tarification (comme les frais établis selon la période d'utilisation), les normes et les programmes de préservation peuvent aider à réduire la demande de pointe : cela fait diminuer le besoin de générer de l'électricité qui sera en grande partie inactive (sauf si elle sert à transformer de l'électricité en gaz) et ainsi, les coûts globaux du système sont réduits.

Une demande souple peut permettre de s'assurer que les réseaux électriques sont prompts à réagir au caractère variable de l'énergie renouvelable. Afin de réduire la demande de pointe, un réseau électrique intelligent peut modifier le moment où des chauffe-eau électriques fonctionnent ou des voitures électriques sont chargées, afin de profiter des périodes où l'électricité est abondante et les prix, plus bas. De la même façon, quand les prix de l'électricité sont bas, un bâtiment peut se servir du réseau électrique pour chauffer une masse thermique; plus tard, quand la demande d'électricité et les prix sont élevés, cette énergie stockée peut être libérée pour chauffer un espace ou de l'eau sans faire appel au réseau électrique.

.....



Libérer l'industrie des émissions

« La décarbonisation ne vise pas à éliminer l'industrie : il s'agit plutôt d'appliquer des politiques et d'outiller les marchés en vue de réorienter les investissements dans l'ensemble de l'économie canadienne pour faire face à la concurrence dans un contexte où l'accent est mis sur la décarbonisation. »
– DDPP, 2015, p. 40 [traduction libre]

Le secteur industriel a traditionnellement été considéré comme étant difficile à décarboniser, car il est hétérogène et qu'il génère d'importantes quantités de GES dans un contexte où les installations industrielles canadiennes doivent faire face à la concurrence internationale⁵⁷. De plus, la plupart des procédés industriels ont été élaborés au fil des décennies en fonction d'un approvisionnement abondant et relativement peu coûteux en combustibles fossiles, sans tenir compte des émissions produites, ou si peu. Une approche stratégique visant la décarbonisation de l'industrie canadienne doit tenir compte du fait que nous devons décarboniser le secteur sans pour autant désindustrialiser l'économie. Nous avons encore besoin de ciment, de fer, d'acier, d'aluminium, de produits chimiques et d'autres produits industriels dans un avenir décarbonisé. En outre, il n'y a pas de victoire climatique lorsque les politiques canadiennes font en sorte que des installations industrielles sont délocalisées dans un pays aux normes environnementales peu rigoureuses – un phénomène connu comme le transfert d'émissions de carbone (se reporter à l'encadré 8)⁵⁸.

Des recherches récentes ont démontré qu'il est possible de décarboniser le secteur industriel en limitant au minimum les actifs délaissés, en prévenant le « traumatisme social » lié au chômage et en évitant le transfert des émissions de carbone⁵⁹. La décarbonisation de l'industrie peut passer par l'électrification des procédés grâce à l'utilisation de technologies de capture et stockage de carbone pour capter les émissions provenant des procédés actuels alimentés par des combustibles fossiles, sans oublier le déploiement de procédés de prochaine génération faisant appel à des vecteurs énergétiques comme l'hydrogène⁶⁰. Plusieurs des technologies requises ont déjà été commercialisées ou le seront bientôt, « mais elles ne sont pas concurrentielles à l'heure actuelle sans une tarification du carbone ou d'autres interventions sur le marché » (se reporter à la section 6)⁶¹.

Les stratégies de décarbonisation différeront d'un secteur à l'autre. Dans le secteur du ciment, par exemple, les options de décarbonisation comprennent la réduction de l'utilisation de scorie de ciment (carbonate de calcium auquel on retire le CO₂) dans le ciment, l'ajout de bois, de chanvre ou de fibre de carbone dans le béton pour en accroître la résistance au cisaillement et

réduire le besoin de ciment, ou bien l'utilisation de technologies de capture et stockage de carbone pour capter le CO₂ qui a été retiré du carbonate de calcium lors de la fabrication de scorie de ciment.

Comme les installations industrielles ont une longue durée de vie, d'une part, les entreprises doivent prendre des mesures de planification et, d'autre part, des règlements gouvernementaux, des politiques d'investissement et des signaux de prix doivent être mis en place dès aujourd'hui pour s'assurer que les nouveaux investissements dans le secteur industriel n'aient pas pour effet de « verrouiller » des procédés générateurs de GES (se reporter à l'encadré 4). Le soutien stratégique du gouvernement en matière de décarbonisation du secteur industriel peut permettre de s'assurer que l'industrie canadienne continue d'être concurrentielle dans un contexte mondial où l'empreinte carbone sera limitée.

ENCADRÉ 4

VERROUILLAGE DES ÉMISSIONS

De nouveaux investissements à l'égard d'infrastructures et d'équipement à long terme qui produisent une grande quantité d'émissions, comme des centrales de production d'énergie, des pipelines et des procédés industriels peuvent entraîner le verrouillage des émissions futures, car les investisseurs se concentrent sur la récupération de leur investissement. Or, ce verrouillage agit comme une barrière à l'action sur les changements climatiques. En effet, quand on réalise un investissement dans des infrastructures ou équipements produisant un volume important de GES, la société a deux options : porter le fardeau que représentent les émissions générées par ces projets pendant toute leur durée de vie ou bien payer pour les mettre hors service prématurément. Les chemins vers un avenir à zéro émission exigent que les investisseurs radient leur investissement et remplacent l'équipement par un substitut non polluant, ou bien qu'ils investissent dans des rénovations pour capter les émissions ou passer à des combustibles à zéro émission. Autrement, les gouvernements sont obligés d'absorber ces coûts, et toutes ces options ont pour effet d'accroître les coûts liés à l'atteinte de l'objectif zéro.



5



Passer aux carburants renouvelables

« Les secteurs de l'expédition et de l'aviation seront plus difficiles à décarboniser, car on prévoit que la croissance de la demande dans ces secteurs sera plus grande que celle d'autres modes de transport. Ces deux segments devraient appliquer des plans d'amélioration

de l'efficacité énergétique très ambitieux et utiliser des combustibles à faibles émissions en carbone. » Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C, 2018. [traduction libre]

Dans certaines applications, comme les vols internationaux, le transport de marchandises sur de longues distances et l'expédition par voie maritime, la densité énergétique des batteries peut ne pas suffire à rendre ces options de transport à la fois libres d'émissions et concurrentielles sur le plan des coûts (se reporter à l'encadré 5). Dans ces cas, des combustibles de remplacement à faibles émissions en carbone sont requis pour réduire les émissions de GES à zéro⁶².

En Californie et en Colombie-Britannique, des biocarburants comme l'éthanol et le biodiesel ont déjà contribué à réduire l'intensité carbonique des combustibles utilisés dans le secteur des transports⁶³, et leur application à plus grande échelle semble prometteuse⁶⁴. Certains des premiers projets de production de biocarburants, particulièrement au moyen de maïs ou d'autres matières premières pour générer de l'éthanol, n'ont pas généré d'avantages climatiques nets⁶⁵. Des recherches sont menées dans ce secteur en vue de réduire les coûts de production et de mieux utiliser les matières celluloseuses, comme les résidus de bois et d'autres flux de déchets comme matières premières. Les avantages climatiques du passage des combustibles fossiles aux biocarburants dépendent de la sélection de l'assise territoriale, des pratiques de gestion des terres et des espèces cultivées; de plus, il faut éviter de libérer le carbone déjà stocké dans le sol et dans la végétation préexistante⁶⁶. En outre, il faut agir avec soin pour s'assurer que la production de biocarburant ne nuit pas à la biodiversité⁶⁷ et n'entre pas en concurrence avec la production alimentaire. Enfin, si les biocarburants sont appelés à jouer un rôle dans la fourniture de combustibles liquides dans un contexte mondial à zéro émission de carbone, la recherche doit confirmer que la production d'énergie nette est positive⁶⁸ et que les avantages climatiques sont réels⁶⁹.

De l'hydrogène à zéro émission peut être produit par électrolyse en utilisant de l'électricité à zéro émission. La disponibilité d'énergie éolienne à faible coût et les améliorations apportées au procédé d'électrolyse ont rendu l'hydrogène à zéro émission concurrentiel sur le plan des



Crédit photo: Green Energy Futures

coûts dans certaines applications spécialisées, et l'hydrogène devrait générer de meilleurs résultats du point de vue économique au cours des prochaines années⁷⁰. Or, l'hydrogène pose des défis sur le plan du stockage et de nouvelles avancées technologiques sont nécessaires avant qu'il puisse jouer un rôle majeur dans un système énergétique à faibles émissions en carbone. En effet, pour le stockage en vrac et le transport sous forme liquide, l'hydrogène doit être maintenu dans des réservoirs de stockage à -253 °C . Dans les véhicules à pile à combustible actuels, il est habituellement stocké sous forme de gaz comprimé dans de grands réservoirs à très haute pression. D'importants efforts de recherche et développement sont actuellement menés à l'égard de systèmes de stockage utilisant des matières capables d'absorber l'hydrogène et de le libérer en temps opportun⁷¹.

Par ailleurs, l'ammoniac liquide (NH_3) produit à l'aide d'électricité affiche aussi du potentiel en tant que combustible à zéro émission de carbone. Sa densité énergétique est supérieure à celle de l'hydrogène liquide, il peut être stocké sous forme liquide à une pression modérée, et puisqu'il est employé dans la production d'engrais et l'industrie chimique, la technologie utilisée pour son stockage et son transport est déjà bien avancée⁷².

L'économie à faibles émissions en carbone nous donne un nouveau vocabulaire. Les électrocarburants sont des combustibles à base de carbone – comme l'essence, le diesel et

le carburéacteur –, mais ils sont produits à l'aide d'électricité et de CO₂, et leur combustion est plus propre que celle des combustibles fossiles. Dans son usine de Squamish, en Colombie-Britannique, l'entreprise Carbon Engineering Ltd. mène actuellement un projet pilote visant à commercialiser le captage direct du CO₂ présent dans l'atmosphère pour le convertir en combustible synthétique⁷³. Si un avion était alimenté au moyen du carburant aviation synthétique produit grâce au captage direct du CO₂ en employant de l'électricité renouvelable, les émissions de CO₂ seraient éliminées : en effet, le CO₂ requis pour produire le combustible serait obtenu dans l'atmosphère, puis libéré de nouveau dans l'atmosphère au moment de la combustion du carburant. La disponibilité d'électricité renouvelable abondante à faible coût et les améliorations apportées aux procédés de captage du CO₂ accroîtront les chances que les électrocarburants remplacent les combustibles fossiles.



Crédit photo: Green Energy Futures

.....

ENCADRÉ 5

DENSITÉ ÉNERGÉTIQUE

Mesure de l'énergie disponible par unité de volume (p. ex., GJ/L pour les combustibles liquides) ou par unité de masse (p. ex., GJ/kg de batterie). Une densité énergétique plus élevée est généralement avantageuse.

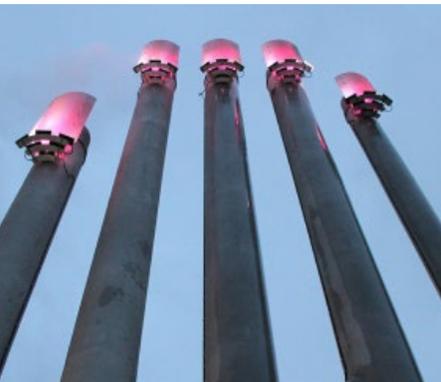
.....



Mobiliser les ressources financières

« Les investissements énergétiques dans un contexte de décarbonisation profonde ne représentent pas une hausse importante de l'investissement énergétique total requis en l'absence de politiques climatiques, mais un changement de cap de l'investissement qui suppose l'abandon des combustibles fossiles au profit de technologies à faibles émissions en carbone. » - Bataille et al.⁷⁴ [traduction libre]

Selon l'analyse du DDPP, l'atteinte de l'objectif de zéro émission d'ici 2050 nécessitera une légère augmentation du niveau global d'investissement dans l'économie canadienne. Toujours d'après ce rapport, l'investissement global au Canada doit augmenter de 13,2 milliards de dollars par année. De son côté, dans une analyse des scénarios du PTAE, Le Conference Board du Canada⁷⁵ estime que l'investissement au Canada doit augmenter de 44 à 100 milliards de dollars par année. Ces estimations plus élevées découlent probablement des scénarios du PTAE que le Conference Board a choisi de modéliser. Dans son rapport, le Conference Board examine des scénarios⁷⁶ qui anticipent une hausse de la production de pétrole et de gaz, compte tenu des prévisions établies par l'Office national de l'énergie⁷⁷. L'avenir de la



Crédit photo: Green Energy Futures

L'avenir de la production de pétrole et de gaz est incertain, et les niveaux de production auront des effets importants sur la capacité du Canada d'atteindre l'objectif zéro émission d'ici le milieu du siècle.

production de pétrole et de gaz est incertain, et les niveaux de production auront des effets importants sur la capacité du Canada d'atteindre l'objectif zéro émission d'ici le milieu du siècle. La hausse continue de la production de pétrole et de gaz aux fins d'exportation exigera une plus grande production d'énergie propre pour alimenter le secteur, ce qui fera augmenter l'investissement requis pour atteindre les objectifs climatiques du Canada (se reporter à l'encadré 6). En outre, des émissions plus élevées découlant d'une production accrue de pétrole et de gaz nécessiteront

une réduction plus importante des émissions produites par d'autres secteurs de l'économie, et donc un renforcement de l'investissement dans des solutions à zéro émission. D'après le Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C, pour parvenir à une consommation énergétique nette zéro, il faudra augmenter « de façon marquée » les investissements dans le secteur énergétique à l'échelle mondiale⁷⁸. Selon une autre étude d'envergure mondiale, les dépenses en immobilisations réalisées à l'égard d'un système énergétique à zéro émission sont en partie compensées par les économies de coûts au chapitre du combustible découlant de l'utilisation d'un système énergétique décarbonisé, car l'apport en ressources nécessaire pour générer l'énergie renouvelable – comme le vent, l'eau et l'ensoleillement – est offert sans frais par la nature⁷⁹.

Une hausse des investissements annuels de 13 à 100 milliards de dollars dans l'économie à zéro émission de carbone peut sembler élevée, mais comme le Canada représente une économie de 2,2 billions de dollars où l'investissement s'élève à quelque 500 milliards de dollars annuellement, cette augmentation représenterait entre 2,6 % (une hausse de 13,2 milliards de dollars) et 20 % (une hausse de 100 milliards de dollars)⁸⁰. La transition exigera aussi une révision des priorités d'investissement : en effet, les secteurs de l'économie affichant une empreinte carbone élevée devront être abandonnés au profit de ceux axés sur l'énergie propre. Par exemple, les investissements dans des entreprises fabriquant des composants pour moteurs à combustion interne reculeront, tandis qu'augmenteront ceux visant des entreprises de production de batteries et de composants pour véhicules électriques et à pile à combustible. Les études sur la décarbonisation sont largement convergentes à propos de la nécessité d'augmenter de façon marquée les investissements dans le secteur de l'électricité. Par ailleurs, l'analyse du DDPP indique qu'une somme supplémentaire de 13,5 milliards de dollars par année est requise pour mettre en place la capacité élargie de génération d'électricité propre nécessaire aux fins de la décarbonisation.

ENCADRÉ 6 L'AVENIR DE LA PRODUCTION DE PÉTROLE ET DE GAZ AU CANADA

La production future de pétrole et de gaz au Canada constitue un important facteur inconnu au moment d'évaluer les chemins vers l'atteinte de l'objectif zéro émission. Le secteur pétrolier et gazier emploie de grandes quantités d'électricité et de gaz naturel aux étapes d'extraction, de raffinage et de transport. L'extraction de pétrole des sables bitumineux canadiens est un procédé particulièrement énergivore qui représente 25 % de tout le gaz naturel consommé au Canada⁸¹, et cette utilisation de l'énergie génère d'importantes émissions de GES. Les fuites, la mise à l'air et le torchage de méthane dans ce secteur sont aussi responsables d'au moins 5 % des émissions canadiennes de GES⁸², et des évaluations récentes sur le terrain indiquent que les émissions répertoriées dans l'inventaire national des GES sont sous-évaluées⁸³. Au total, le secteur pétrolier et gazier canadien a été responsable de 27 % des émissions canadiennes de GES en 2017⁸⁴, en plus d'afficher une tendance à la hausse depuis 1990. Plus



Crédit photo: Green Energy Futures

Le Canada continuera de mettre l'accent sur la production de pétrole et de gaz pour l'exportation, plus il sera difficile de réduire à zéro les émissions au pays, et il faudra renforcer les efforts à ce chapitre dans les autres secteurs de l'économie.

Les prévisions quant à la production future de pétrole varient considérablement. Le pétrole et le gaz sont des marchandises commercialisées sur le marché mondial, ainsi, le Canada exerce une faible maîtrise sur la demande et les prix. Selon les prévisions de l'Office national de l'énergie, des prix futurs du pétrole élevés pourraient entraîner une hausse de la production de 90 % par rapport aux niveaux de 2018 au Canada d'ici 2040, tandis que des prix faibles pourraient faire chuter la production en 2040 de 20 % par rapport à 2018⁸⁵. Que les prix futurs du pétrole soient élevés ou bas dépendra de l'offre et de la demande mondiales. Le « scénario Sky » de Shell présente un avenir à zéro émission nette issue de l'énergie d'ici 2070. Dans ce scénario, Shell prévoit que la demande mondiale de pétrole atteindra un sommet en 2025, et celle de gaz naturel, en 2035.⁸⁶ La demande de ces combustibles diminuerait ensuite pendant le reste du siècle.

Le scénario Sky fait écho à l'objectif consistant à « contenir l'élévation de la température de la planète nettement en dessous de 2 °C »⁸⁷.

Dans un monde où la demande de pétrole diminue, les producteurs canadiens concurrenceraient les producteurs du monde entier pour conserver leur part de marché. Dans cette situation de concurrence, les ressources canadiennes en bitume et pétrole lourd se trouvent désavantagées, compte tenu du volume important d'émissions de GES associé à la production⁸⁸ et du fait qu'une grande partie des extraits prend la forme de pétrole brut lourd, qui contient plus de soufre et de métaux lourds et dont le raffinage est plus coûteux, énergivore et exigeant du point de vue technique⁸⁹. À moins que le bitume ne soit traité dans des raffineries équipées pour le pétrole lourd, dont le nombre est limité, la production est plus élevée pour les produits de faible valeur, ce qui réduit les marges bénéficiaires⁹⁰. La viabilité économique de la production de pétrole et de gaz au Canada dépend aussi des subventions accordées au secteur par les gouvernements fédéral et provinciaux, ainsi que des politiques et du régime de tarification du carbone appliqués⁹¹. Un tiers des réserves mondiales de pétrole devrait demeurer inutilisé pour limiter la hausse de la température à 2 °C⁹² et, compte tenu de la concurrence internationale de la part de producteurs à faible coût, l'exploitation accrue des sables bitumineux canadiens serait probablement peu rentable dans le contexte d'une limitation de la hausse de la température à 2 °C⁹³. Cela pourrait vouloir dire que jusqu'à 75 % des réserves canadiennes de pétrole resteraient sous terre pour atteindre l'objectif de 2 °C, y compris entre 85 % et 99 % des réserves de bitume⁹⁴.

Des modèles récents montrent qu'il est encore raisonnablement probable d'atteindre les objectifs climatiques à l'échelle mondiale si, à partir de 2018, l'infrastructure actuelle axée sur les combustibles fossiles dans les secteurs de l'énergie, du transport et de l'industrie est retirée et remplacée par une infrastructure utilisant des combustibles de remplacement à zéro émission, et ce, dès que chaque élément d'actif atteint la fin de sa vie utile prévue⁹⁵.

Toutefois, si la date d'élimination des nouveaux investissements dans l'infrastructure basée sur les combustibles fossiles est reportée à 2030, les objectifs climatiques à l'échelle mondiale ne seront probablement pas atteints⁹⁶. Par ailleurs, des politiques gouvernementales seront nécessaires pour assurer le remplacement des infrastructures actuelles par des infrastructures à zéro émission. La demande de pétrole peut être réduite en adoptant des politiques visant la demande qui découragent l'utilisation de combustibles fossiles (p. ex., tarification du carbone) ou qui encouragent l'utilisation de combustibles de remplacement (p. ex., incitatifs en vue de l'utilisation de véhicules électriques), ou bien en adoptant des politiques visant l'offre qui limitent la production de pétrole et de gaz (p. ex., limitation de la production de pétrole, élimination de zones d'exploration ou établissement de moratoires visant les pétroliers ou la construction de nouveaux oléoducs)⁹⁷. Pour assurer le respect du scénario prévoyant une hausse des températures de 1,5 °C à l'échelle mondiale, le secteur pétrolier et gazier doit réduire la production de 3 % par année à partir de maintenant et jusqu'en 2050, tandis que dans le scénario prévoyant une hausse des températures de 2 °C, la réduction doit être de 2 % par année⁹⁸. Si l'on réussit à atteindre les objectifs climatiques établis dans l'Accord de Paris à l'échelle mondiale, alors la demande de pétrole au Canada pourrait par la suite atteindre le palier inférieur des prévisions de 2018 de l'Office national de l'énergie. Le pays pourrait ensuite subir des conséquences économiques négatives (p. ex., pertes d'emploi dans les provinces productrices de pétrole) à mesure que les actifs pétroliers et gaziers seront délaissés⁹⁹. Il faut tenir compte de ces pertes pour que le Canada réalise une transition équitable (se reporter à la stratégie 10).

.....

L'importance des investissements requis fournira aux Canadiens des occasions d'investir et de profiter des retombées d'un avenir plus vert¹⁰⁰. Les investissements dans une infrastructure verte peuvent aussi être favorisés par la création d'une Banque de l'infrastructure du Canada et d'obligations climatiques permettant aux Canadiens de rediriger leurs investissements des combustibles fossiles vers l'infrastructure de demain fondée sur l'énergie propre. Plus tôt le Canada réorientera-t-il ses investissements vers des stratégies de décarbonisation profonde et moins il sera probable que des investissements soient réalisés dans des actifs qui seront délaissés en vertu de politiques climatiques (se reporter à l'encadré 7).

Ces investissements aident à limiter les conséquences et les coûts du changement climatique. Selon le rapport Stern sur l'économie du changement climatique, publié en 2006, « les avantages de la prise de mesures fermes et précoces sont largement supérieurs aux coûts économiques associés à l'inaction. »¹⁰¹ Des analyses économiques subséquentes ont établi qu'à l'échelle mondiale, des investissements visant à réduire les émissions à zéro afin d'éviter un réchauffement de plus de 1,5 °C à 2 °C sont prudents du point de vue économique, car ils contribuent à éviter les dommages associés à des événements climatiques extrêmes et au bouleversement climatique¹⁰². En l'absence de mesures, le coût des dommages matériels découlant des changements climatiques au Canada devrait atteindre 43 milliards de dollars par année d'ici 2050¹⁰³.

ENCADRÉ 7 ACTIFS DÉLAISSÉS

« Par ailleurs, certains investissements dans des combustibles fossiles réalisés au cours des prochaines années – ou déjà réalisés pendant les dernières années – devront probablement être éliminés avant la récupération complète des dépenses en immobilisations ou avant la fin de la durée de vie utile des actifs. » – Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 oC, chapitre 2, p. 154 [traduction libre]

Que sont les actifs délaissés? Selon la banque d'investissement HSBC, « les actifs délaissés sont ceux qui perdent de la valeur ou qui deviennent des passifs avant la fin de leur durée économique prévue. Dans le contexte des combustibles fossiles, ce concept désigne les actifs qui ne seront pas brûlés, c'est-à-dire ceux qui demeureront sous terre. » Les actifs délaissés peuvent aussi désigner des pipelines ou des installations de production de charbon qui sont abandonnés en raison de leur intensité carbonique avant le remboursement des dépenses en immobilisations.

Selon une analyse de l'empreinte carbone mondiale, une grande partie des réserves détenues par des entreprises exploitant des combustibles fossiles et comptabilisées comme des actifs dans leurs états financiers ne peuvent pas être brûlées si l'on veut stabiliser le système climatique. Ainsi, la valeur des actions de beaucoup d'entreprises charbonnières – dont les réserves figurent parmi les plus importantes sources d'émissions de carbone – a déjà baissé¹⁰⁴. Mark Carney, ancien gouverneur de la Banque du Canada, a mis en garde contre une bulle du carbone si les entreprises ne procèdent pas à l'évaluation, à la divulgation et à la gestion de leur empreinte carbone.¹⁰⁵ Qui plus est, les organismes canadiens de réglementation des valeurs mobilières n'obligent pas encore les entreprises canadiennes à divulguer le risque climatique aux investisseurs¹⁰⁶. Le Climate Risk Disclosure Project s'efforce de repérer, à l'échelle internationale, les entreprises qui risquent de perdre de la valeur à mesure que l'action climatique mondiale prend de l'ampleur. D'après un récent sondage britannique réalisé auprès de gestionnaires de fonds dont les actifs gérés s'élèvent à 13 milliards de livres sterling, 89 % d'entre eux pensent que les risques climatiques pourraient avoir des effets sur la valeur des entreprises exploitant des combustibles fossiles d'ici cinq ans¹⁰⁷.

7



Uniformiser les règles du jeu

« Les signaux en matière d'innovation et de commercialisation envoyés par les politiques provinciales actuelles sont beaucoup trop faibles pour susciter une innovation cohérente par rapport à une décarbonisation à plus long terme. » – DDPP, p. 6 [traduction libre]

Afin de rediriger les investissements au sein de l'économie canadienne, le gouvernement doit envoyer les bons signaux sur le plan des politiques adoptées. Le principe du pollueur-payeur est une pratique de longue date adoptée par les pays de l'Organisation de coopération et de développement économiques. La tarification du carbone est une autre politique qui intègre le principe du pollueur-payeur et qui est présente dans les scénarios de décarbonisation profonde que nous avons analysés. La tarification du carbone fait en sorte que polluer coûte plus cher et crée des incitatifs pour améliorer l'efficacité énergétique, passer à des sources d'énergie à zéro émission, innover et créer de nouvelles technologies. Une analyse récente de 18 pays développés ayant réussi à réduire leurs émissions confirme le rôle important que peut jouer la tarification du carbone pour atténuer les émissions¹⁰⁸.

Créée en 2008, la taxe sur le carbone de la Colombie-Britannique est largement citée comme un exemple de l'efficacité de la tarification du carbone¹⁰⁹. Une analyse de cette politique a montré que la tarification du carbone a permis de réduire les émissions¹¹⁰ sans entraîner de perte nette d'emplois dans la province¹¹¹. Par ailleurs, la tarification du carbone fera vraisemblablement augmenter les investissements à l'égard de l'économie propre¹¹².

Le signal du prix sur le carbone établi dans la *Loi sur la tarification de la pollution causée par les gaz à effet de serre* du gouvernement fédéral canadien prévoit le versement d'une redevance de 20 \$ la tonne en 2019, puis d'une hausse annuelle de 10 \$ la tonne, jusqu'à concurrence de 50 \$ la tonne en 2022. Pour être crédible et efficace, le signal du prix sur le carbone devrait continuer d'augmenter chaque année jusqu'en 2050. Une conception méticuleuse de la tarification peut permettre d'éviter le transfert des émissions de carbone et de réduire au minimum les effets négatifs de la tarification du carbone sur l'économie canadienne (se reporter à l'encadré 8).

Pour être crédible et efficace, le signal du prix sur le carbone devrait continuer d'augmenter chaque année jusqu'en 2050 atteindre nos objectifs.

ENCADRÉ 8 ÉVITER LE TRANSFERT DES ÉMISSIONS DE CARBONE

Le transfert des émissions de carbone se produit quand les politiques climatiques d'un territoire font en sorte que des installations industrielles sont délocalisées dans des territoires aux normes environnementales peu rigoureuses. Une telle situation risque de faire diminuer l'activité économique à des endroits où l'on adopte des mesures avant-gardistes en matière de lutte contre le changement climatique, en plus d'échouer au chapitre de la réduction des émissions de GES à l'échelle mondiale, qui sont alors simplement produites dans des territoires aux normes climatiques permissives. La tarification du carbone peut être conçue de manière à limiter au minimum le transfert des émissions de carbone, particulièrement dans des secteurs faisant partie des plus grands consommateurs d'énergie et des plus exposés en matière de commerce, comme ceux de l'acier, des produits chimiques et de l'exploitation minière.

Afin de protéger ses entreprises exposées sur le plan du commerce, en 2017, le gouvernement de la Saskatchewan a créé une norme régissant l'intensité des GES fondée sur le rendement à l'égard de la production industrielle lourde. Ainsi, les entreprises qui ne réduisent pas l'intensité de leurs émissions de GES en fonction d'une certaine cible doivent payer une taxe sur le carbone pour toutes les émissions qui dépassent le seuil établi. Toutefois, ces entreprises ne paient pas de prix du carbone par tonne de pollution générée. Ces mesures permettent aux entreprises de demeurer concurrentielles tout en fournissant un signal en vue de réduire les émissions. Le système de tarification fondé sur le rendement du gouvernement fédéral fonctionne de manière semblable.

Les mesures visant à éviter le transfert des émissions de carbone constituent un outil de transition qui deviendra moins justifiable à mesure que la tarification du carbone sera adoptée dans le monde¹¹³. Or, jusqu'à ce que cette tarification soit largement adoptée, les pays qui fixent un prix du carbone auraient intérêt à apporter des « ajustements aux mesures transfrontalières » visant le carbone : voilà un autre outil pour limiter le risque de transfert des émissions. En vertu de ces ajustements, on applique un tarif aux importations en fonction de leur teneur en carbone, tout en tenant compte de la différence entre le prix du carbone au Canada et dans le pays exportateur. On peut utiliser l'analyse du cycle de vie pour estimer la teneur en carbone des importations et calculer le tarif approprié¹¹⁴. Le but du tarif est d'éviter que les marchandises produites sans l'établissement d'un prix du carbone livrent une concurrence déloyale aux produits locaux¹¹⁵. Par exemple, le Canada pourrait imposer des ajustements – équivalant au prix local du carbone – aux importations provenant de pays qui ne fixent pas de prix du carbone¹¹⁶. De la même façon, le Canada pourrait offrir des rabais aux entreprises qui exportent vers des marchés qui ne réalisent pas de tarification du carbone.

La tarification du carbone a des effets sur le plan de l'équité, car les coûts et les avantages ne sont pas répartis de la même manière entre les ménages. L'incidence nette de la tarification du carbone sur les ménages canadiens dépendra de la façon dont seront utilisés les revenus découlant de cette tarification. Dans les scénarios du DDPP, les revenus tirés de la tarification du carbone sont utilisés pour réduire l'impôt sur le revenu des particuliers et des sociétés (50 % des revenus pour chaque secteur, afin de s'assurer que la tarification n'a pas d'effet sur les revenus). Dans son analyse des scénarios du PTAE, Le Conference Board du Canada présume que seuls 50 % des revenus tirés de la tarification du carbone sont retournés sous la forme d'une réduction de l'impôt sur le revenu des particuliers et des sociétés, tandis que 40 % sont affectés aux dépenses publiques, et 10 %, à l'administration des politiques. Dans l'analyse du Conference Board, même si la tarification du carbone augmentait pour atteindre 200 \$ la tonne d'équivalent CO₂ d'ici 2025, le recyclage des recettes permettrait de s'assurer que l'effet sur le PIB ne signifierait qu'un écart de 0,1 % ou 0,2 % au chapitre des extrants, par rapport à un PIB dans le cours normal des affaires¹¹⁷.

Dans les provinces assujetties à la tarification du carbone fédérale, 90 % des revenus obtenus au moyen de la tarification du carbone sont retournés aux ménages sous la forme de paiements incitatifs¹¹⁸. On s'assure ainsi que la plupart des ménages de territoires moins



Crédit photo: Alesia Kazantceva

Outre la tarification de la pollution, les gouvernements peuvent employer d'autres moyens pour envoyer des signaux aux marchés afin qu'ils accélèrent le passage à une économie à zéro émission de carbone.

favorisés, et particulièrement ceux qui se trouvent dans la partie inférieure du modèle de répartition des revenus, s'en sortent mieux financièrement par suite de la tarification du carbone. La tranche restante de 10 % des revenus tirés de la tarification du carbone est versée aux municipalités, aux institutions comme les hôpitaux et les universités, et aux petites entreprises, afin de compenser la hausse des prix de l'énergie¹¹⁹. Au moyen de mesures comme la taxe sur le carbone de la Colombie-Britannique et de l'Alberta¹²⁰, et le système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre du Québec, les gouvernements utilisent aussi une partie des revenus pour faire la promotion des investissements dans l'efficacité énergétique, la technologie propre, le transport en commun et l'énergie renouvelable.

Les gouvernements peuvent aussi soutenir les efforts de décarbonisation en éliminant les subventions accordées au secteur des combustibles fossiles. Des subventions directes, comme l'allègement fiscal des investissements dans le secteur pétrolier et gazier, et indirectes, comme des taux de redevance faibles ou des exemptions de versement,



Crédit photo: Green Energy Futures

encouragent l'investissement dans l'industrie des combustibles fossiles grâce à une augmentation des profits. En effet, les subventions visant les combustibles fossiles agissent comme des prix du carbone négatifs qui favorisent des investissements à teneur élevée en carbone et retardent la transition vers un avenir décarbonisé¹²¹. Au Canada, le méthane – qui produit d'importantes émissions de GES – est assujéti à une nouvelle réglementation fédérale et provinciale, mais les émissions de méthane du secteur pétrolier et gazier ne sont pas assujétiées à un prix du carbone¹²², et cette absence de tarification peut aussi être considérée comme une subvention.

Outre la tarification de la pollution, les gouvernements peuvent employer d'autres moyens pour envoyer des signaux aux marchés afin qu'ils accélèrent le passage à une économie à zéro émission de carbone. En adoptant une Norme sur les combustibles propres ou une Norme sur les carburants à faible teneur en carbone, les gouvernements peuvent exercer de la pression sur les marchés afin que les entreprises de raffinage et les distributeurs trouvent des moyens de réduire la teneur en carbone des combustibles qu'ils produisent et vendent¹²³. De cette façon, les émissions du secteur des transports sont réduites sans que les chauffeurs en soient nécessairement conscients. La teneur en carbone du combustible est calculée en fonction de son cycle de vie. Les entreprises de raffinage qui produisent des combustibles à

très faible teneur en carbone (p. ex., contenant des biocarburants ou des électrocarburants) peuvent vendre leurs crédits excédentaires à des concurrents qui utilisent des combustibles à teneur en carbone élevée. L'électricité fournie pour alimenter les véhicules électriques et l'hydrogène produit au moyen d'énergies renouvelables pour alimenter les véhicules électriques à pile à combustible peuvent aussi être comptabilisés comme des combustibles et générer des crédits. Au fil du temps, la norme doit devenir plus stricte, ce qui obligera les fournisseurs de combustible à innover, et ainsi, à réduire leurs émissions. Par ailleurs, cette norme aidera à accélérer l'utilisation de véhicules à zéro émission. La toute première norme sur les carburants à faible teneur en carbone à l'échelle mondiale est entrée en vigueur en Californie en 2009 : elle prévoyait une réduction de 10 % de l'intensité des GES produits par les combustibles utilisés dans le secteur des transports d'ici 2020¹²⁴. On estime que les émissions de CO₂ ont déjà diminué de 10 %, et la vague d'innovation déclenchée par la norme a fait en sorte que la teneur en carbone des combustibles de remplacement a chuté de 15 % depuis son entrée en vigueur¹²⁵. La Colombie-Britannique lui a emboîté le pas en 2010 en établissant des exigences en matière de combustibles de source renouvelable et à faibles émissions en carbone. En 2016, le gouvernement du Canada a annoncé son intention de créer une Norme sur les combustibles propres qui, plus tard, ne s'appliquera plus seulement aux combustibles utilisés dans le secteur des transports, mais aussi aux combustibles gazeux utilisés pour le chauffage et les applications industrielles. En ce qui concerne le secteur canadien du camionnage, un modèle suggère qu'il pourrait être largement alimenté par du diesel renouvelable produit par hydrogénation qui, contrairement au biodiesel, peut être brûlé dans les camions actuels, sans modifier les moteurs¹²⁶.

Les administrations municipales peuvent aussi utiliser des signaux de prix pour favoriser la réduction des émissions et améliorer la qualité de vie de leurs résidents. Il a été démontré que la tarification de la congestion, en vertu de laquelle les usagers de la route paient davantage lorsqu'ils conduisent pendant les périodes de pointe, améliore l'écoulement de la circulation, accroît l'utilisation du transport en commun et du covoiturage, et réduit la pollution de l'air urbain¹²⁷. En effet, des frais relativement modestes permettent de modifier le moment ou le mode de déplacement d'un nombre suffisant de conducteurs pour réduire le débit routier, et les fonds recueillis peuvent être investis dans les infrastructures de transport en commun et de transport actif. Cette approche a été adoptée avec succès à Stockholm, à Londres et à Milan, elle sera appliquée à New York, et sa mise en œuvre a été proposée dans la région métropolitaine de Vancouver¹²⁸.

Des politiques complémentaires bien conçues, comme les investissements dans les bornes de recharge pour véhicules électriques et les infrastructures de transport en commun et de transport actif, améliorent l'efficacité de la tarification du carbone en fournissant des solutions de recharge à zéro émission.

En outre, un système de tarification incitative peut être mis en place pour l'achat de véhicules, afin d'encourager l'investissement dans des parcs à faibles émissions sans dépendre du financement du gouvernement. Dans ce contexte, l'achat de nouveaux véhicules à fortes émissions est assujéti à des frais, et ces fonds peuvent servir à réduire le coût des véhicules à faibles émissions.

« La tarification à elle seule ne suffit pas. » – DDPP, p. 39 [traduction libre]

Les études sur la décarbonisation dressent un constat commun : la tarification du carbone n'est qu'un outil important parmi d'autres dans le cadre d'une politique climatique bien conçue et de grande portée. Il est aussi essentiel d'appliquer une réglementation bien conçue qui permette de réduire les émissions tout en offrant aux ménages et aux entreprises la souplesse nécessaire pour répondre de la manière la plus rentable (Bataille et al., 2016b: S20). De son côté, Mark Jaccard affirme qu'une réglementation bien conçue peut être aussi efficace que la tarification du carbone, tout en étant moins controversée du point de vue politique¹²⁹. Cela est dû en partie au fait que les coûts imposés par la réglementation sont moins évidents pour les consommateurs. Par ailleurs, les études sur la décarbonisation appuient l'établissement de règlements : mentionnons par exemple les normes d'efficacité énergétique visant les nouveaux bâtiments, les normes de rendement énergétique pour les automobiles, ainsi que les règlements visant la réduction des émissions de méthane dans le secteur pétrolier et gazier. Une conception intelligente de la réglementation permettrait de s'assurer qu'elle est souple et qu'elle joue un rôle complémentaire à l'égard de la tarification du carbone, au lieu de doubler les efforts déployés dans le cadre de la tarification du carbone¹³⁰. Des politiques complémentaires bien conçues, comme les investissements dans les bornes de recharge pour véhicules électriques et les infrastructures de transport en commun et de transport actif, améliorent l'efficacité de la tarification du carbone en fournissant des solutions de recharge à zéro émission.



Réinventer nos collectivités

« Au cœur de la ville se trouve une occasion, car la densité urbaine présente un mode de vie plus vert. La densité urbaine peut donner lieu à une meilleure qualité de vie et réduire l’empreinte carbone grâce à une infrastructure plus efficace et à une amélioration de la planification urbaine. » – C40 [traduction libre]

Comme plus de 80 % des Canadiens vivent dans des zones urbaines¹³¹, les administrations municipales ont un important rôle à jouer dans l’atteinte de l’objectif zéro émission. La conception des villes et la planification de l’utilisation du sol ont des répercussions sur la faisabilité de systèmes de transport en commun, la proportion de résidents pouvant utiliser des modes de transport actifs, comme la marche et le vélo, ainsi que le temps moyen de déplacement¹³². Une stratégie de croissance intelligente en matière de planification urbaine concentrerait la croissance dans des centres urbains compacts, bien desservis, et où il est possible de marcher. Une telle approche permet de choisir parmi plusieurs options de logement et encourage un mélange de types de bâtiments, d’usages et de durées des baux. Ainsi, les lieux de travail, les magasins et les logements se trouvent à proximité les uns des autres, ce qui réduit les distances de déplacement et encourage le recours au transport actif et au transport en commun, au détriment des véhicules personnels. Pour ce qui est des villes et des quartiers plus anciens, à l’égard desquels beaucoup des décisions clés en matière d’infrastructures et d’utilisation du sol ont déjà été prises, l’adoption d’une approche de croissance intelligente peut tout de même contribuer à accroître la densité démographique grâce à l’édification sur terrain intercalaire et à la construction d’immeubles résidentiels à nombreux étages¹³³.





Crédit photo: Dylan Passmore

L'analyse des scénarios indique qu'une planification intelligente de l'utilisation du sol de la part des municipalités peut contribuer à réduire le coût global de la décarbonisation. Le scénario 4 du PTAE a été créé en tenant compte de la façon dont une planification intelligente des villes peut accroître la demande de transport en commun à taux d'occupation élevé, diminuer de 47 % le nombre de passagers-kilomètres parcourus et réduire l'utilisation d'énergie de 14 %¹³⁴. Ces mesures aident à réduire le coût marginal de réduction associé au parcours de décarbonisation du scénario 4 de 100 \$ par tonne d'équivalent CO₂ (PTAE, p. 206).

Une stratégie de croissance intelligente en matière de planification urbaine est souhaitable au-delà de la réduction de GES : en effet, des villes où l'on peut marcher améliorent la santé et la qualité de vie des résidents¹³⁵. De plus, des quartiers à usage mixte encouragent la cohésion sociale et le sentiment d'appartenance à la collectivité. Par ailleurs, les bénéfices indirects d'une conception intelligente des villes indiquent que la décarbonisation peut aller de pair avec un bien-être accru de la population.

En l'absence d'une planification urbaine solide, une réduction majeure des émissions s'avèrera coûteuse, voire physiquement impossible¹³⁶.

Outre une stratégie de croissance intelligente au chapitre de la planification urbaine, les municipalités peuvent appliquer d'autres politiques pour réduire les émissions de GES. De plus, les codes du bâtiment provinciaux et municipaux ainsi que les dispositions de zonage et les plans officiels peuvent favoriser la construction de bâtiments écoénergétiques et à consommation énergétique nette zéro. Les municipalités peuvent aussi exiger que les nouveaux immeubles d'habitation et en copropriété soient munis de bornes de recharge pour véhicules électriques. Des programmes comme le programme *Property Assessed Clean Energy*, ou des initiatives de financement sur les factures de services publics, peuvent fournir du financement à faible coût pour apporter des améliorations en matière d'efficacité énergétique et installer des panneaux solaires photovoltaïques et des thermopompes électriques. Par ailleurs, des bornes de recharge municipales pour véhicules électriques, ainsi que des espaces de stationnement préférentiels pour les véhicules électriques peuvent encourager l'utilisation de véhicules à zéro émission¹³⁷.



Se concentrer sur ce qui compte vraiment

« [] Nous devons devenir de deux à six fois plus efficaces pour ce qui est de transformer l'utilisation de ressources en bien-être humain si nous voulons que tous les humains puissent vivre dans de bonnes conditions dans le respect des limites de notre planète. »

– Daniel O'Neill [traduction libre]

Les Canadiens ne recherchent pas l'énergie en soi : ils veulent plutôt obtenir les services que l'énergie leur procure, comme la mobilité, la commodité, l'éclairage et la communication¹³⁸.

Des technologies et des modèles d'affaires novateurs peuvent entraîner une utilisation très inférieure d'énergie en modifiant notre façon d'aborder et de comprendre la fourniture de services énergétiques – mentionnons par exemple les applications de covoiturage, les téléphones intelligents et les espaces de travail partagés. Une étude publiée en 2018 dans la

revue *Nature Energy* a présenté un grand nombre de telles innovations capables de réduire l'utilisation d'énergie de 50 % ou plus dans le but d'aider à atteindre l'objectif climatique de 1,5 °C¹³⁹. Ainsi, bien des gens choisissent de se concentrer de plus en plus sur les services de mobilité que les véhicules fournissent, plutôt que sur les différents aspects liés au statut conféré par la possession d'une voiture, et ils délaissent les véhicules personnels au profit de réseaux coopératifs ou de services de partage de véhicules qui bouleversent actuellement le marché de la mobilité. Des villes disposant de parcs partagés de véhicules électriques très efficaces sur le plan énergétique utiliseraient la moitié de l'énergie requise pour le transport comparativement aux véhicules privés, tout en diminuant la congestion et le temps de déplacement. De la même façon, un bâtiment conçu pour remplir plusieurs fonctions (p. ex., espace consacré à l'éducation le jour, centre communautaire le soir) réduit le besoin de matériaux de construction, de chauffage et d'éclairage, par rapport à deux bâtiments distincts qui risquent d'être souvent inutilisés.



Crédit photo: James Wheeler

La fourniture de services énergétiques utilisant moins d'énergie

découlera probablement d'innovations qui sont souhaitables, car elles offrent un certain type d'avantage – ces innovations peuvent offrir des améliorations au chapitre des coûts, de la propreté, de la sécurité, de la rapidité ou de la commodité, ou elles peuvent rendre l'expérience plus agréable, notamment du point de vue social. Le téléphone intelligent en est le parfait exemple, car il offre un potentiel de réduction de la consommation d'énergie de jusqu'à 100 fois comparativement à la fabrication individuelle et à l'alimentation des nombreux dispositifs qu'il peut remplacer (appareil GPS, appareil stéréo portatif, caméra, réveil, enregistreur vocal, console de jeu, etc.)¹⁴⁰.

Dans le même ordre d'idée, les Canadiens ne désirent pas de façon inhérente la croissance dans la production de produits et services (la croissance du PIB) : ils recherchent plutôt le bien-être qui peut être atteint lorsque les citoyens ont accès à des produits et services abordables et à du travail valorisant. La tâche de décarbonisation de l'économie devient plus simple quand nous nous concentrons sur le renforcement du bien-être humain plutôt que sur la croissance économique. L'activité économique nécessite de l'énergie et des matières. Même lorsque l'économie devient moins énergivore (que moins d'énergie est nécessaire par dollar de PIB), la croissance du PIB peut annuler ces gains¹⁴¹.

Les taux actuels de croissance économique compliquent déjà la tâche de réduire les émissions à zéro. Si ces taux augmentent, comme le prônent beaucoup de politiciens et de commentateurs économiques, le rythme de décarbonisation devra augmenter pour atteindre les objectifs climatiques¹⁴². Comme l'a souligné Tim Jackson, atteindre nos objectifs climatiques tout en faisant croître l'économie mondiale selon les taux actuels signifie que « l'intensité carbonique de chaque dollar d'extrait doit être plus de 200 fois plus basse qu'elle ne l'est aujourd'hui »¹⁴³. À l'inverse, bien des éléments qui contribuent au bien-être, comme le temps passé avec la famille et les amis, le temps passé dans la nature, le bénévolat et les démarches créatives et artistiques, n'exigent pas une grande utilisation de matières ou d'énergie.

Notre système économique est structuré de façon telle que quand l'économie cesse de croître, nous subissons des effets négatifs, comme le chômage. Or, de plus en plus d'analyses se penchent sur la manière dont la prospérité peut être accrue sans augmenter perpétuellement la taille de l'économie¹⁴⁴. Afin d'éviter le chômage qui limiterait autrement la croissance économique, les gains de productivité peuvent se traduire par une diminution du nombre d'heures de travail par semaine¹⁴⁵. Pour mettre un frein aux styles de vie caractérisés par une consommation effrénée, on pourrait mettre en place des taxes et des restrictions sur la publicité¹⁴⁶. Dans une économie d'après-croissance, le bien-être peut aussi être soutenu par des investissements sociaux dans des biens publics, comme des parcs, et l'on peut mettre l'accent sur le renforcement de la confiance et l'établissement d'institutions démocratiques fortes¹⁴⁷.

En réorientant la politique économique pour s'assurer que l'économie procure des services (alimentation, logement, santé, éducation, loisirs) qui contribuent au bien-être social et psychologique, les niveaux de bien-être peuvent être accrus même dans un contexte où les besoins en énergie diminuent. Des indicateurs de progrès différents du PIB, comme l'indice de progrès véritable¹⁴⁸ ou l'indice canadien du mieux-être¹⁴⁹, peuvent aider en donnant de meilleures pistes relativement à notre objectif réel : le bien-être humain soutenu au fil des générations.

« Heureusement, des innovations technologiques récentes – qui rendent largement accessibles les connaissances et la capacité de production à faible coût et qui font la promotion d'activités créatives et collaboratives – pourraient faciliter la transition vers un monde où l'accent est mis sur la réduction du stress environnemental et le renforcement du bien-être humain. Une vision d'avenir positive, axée sur la résilience et la satisfaction des besoins, et non sur le travail acharné et le sacrifice, devrait orienter notre parcours. »
– Chris Barrington-Leigh



Réaliser une transition équitable

« Les Canadiens possèdent les compétences, les connaissances et la motivation pour prospérer durant cette transition et saisir ces occasions... Les gouvernements, ainsi que les employeurs et les syndicats, doivent veiller à ce que les travailleurs ne soient pas laissés pour

compte à mesure que nous progressons vers une économie plus propre et à faibles émissions de carbone. » – Groupe de travail sur la transition équitable pour les collectivités et les travailleurs des centrales au charbon canadiennes, 2018

LA TRANSITION POUR LES TRAVAILLEURS

Tandis que le Canada s'efforce de réduire de façon importante ses émissions, nous devons nous pencher sur les répercussions de la décarbonisation sur le plan de l'équité. Certaines installations fonctionnant à l'aide de combustibles fossiles, comme les centrales au charbon, devront être fermées. De nouveaux emplois seront créés dans les secteurs de l'efficacité énergétique et du déploiement d'énergies renouvelables et d'autres technologies vertes, et le nombre total d'emplois créés devrait dépasser largement celui des postes perdus dans les secteurs produisant une grande quantité d'émissions¹⁵⁰. Cependant, les nouveaux emplois créés dans le cadre d'une économie propre ne seront pas nécessairement situés dans les mêmes collectivités que les emplois qu'ils remplacent. De plus, les exigences des emplois, les conditions de travail et la paie seront différentes. Afin de s'assurer que l'atteinte de l'objectif zéro émission n'entraîne pas de difficultés socio-économiques et ne diminue pas la qualité de vie des personnes, il faut s'efforcer de garantir une transition inclusive¹⁵¹.



On peut réaliser des progrès à l'égard d'une transition inclusive au moyen de politiques de soutien destinées aux travailleurs des secteurs et des collectivités visés. Des programmes de formation, d'apprentissage et de financement des frais de scolarité peuvent permettre aux travailleurs des secteurs concernés d'acquérir les compétences nécessaires pour trouver un nouvel emploi et limiter le plus possible une éventuelle période de chômage. Par ailleurs, des programmes de prestations de raccordement peuvent permettre de s'assurer que les travailleurs qui prennent une retraite anticipée par suite d'un événement comme la fermeture d'une centrale au charbon disposent d'un soutien financier relativement à leur plan de retraite initial¹⁵². Des centres de transition dans les collectivités visées peuvent aussi fournir de l'information, du soutien en matière d'assurance emploi et de la formation, en plus de servir comme guichet unique pour aider les travailleurs dans leur transition vers un nouvel emploi¹⁵³. Une stratégie globale de transition inclusive veillerait à ce qu'aucun travailleur ne soit laissé à lui-même pendant la transition vers une économie à zéro émission au Canada. Dans le cadre de la planification de la transition, il faudrait déterminer les priorités de développement des collectivités et chercher des moyens d'atténuer les effets des fermetures d'installations industrielles sur le plan culturel et identitaire.

Si elle est bien gérée, la transition vers l'énergie propre peut être un important facteur de création d'emplois de qualité, de progression professionnelle et de réduction des inégalités¹⁵⁴. À l'inverse, une transition mal gérée risque d'entraîner des problèmes économiques inutiles et de miner le soutien public à l'égard des politiques nécessaires en matière de réduction des émissions. La transition devrait être perçue comme faisant partie d'une stratégie verte de développement économique plus vaste favorisant le développement et la diversification économiques de la collectivité¹⁵⁵.

ÉQUITÉ

ENCADRÉ 9 RENDRE L'ÉNERGIE ABORDABLE AU MOMENT DE LA TARIFICATION DE LA POLLUTION CAUSÉE PAR LE CARBONE

Les politiques de tarification du carbone doivent être conçues de manière à la fois équitable et efficace. En effet, dans le cas des consommateurs dont les moyens sont limités, le prix de l'énergie peut les contraindre à faire des choix difficiles. En 2015, l'Office national de l'énergie estimait que 8 % des Canadiens éprouvaient des difficultés à payer pour l'énergie dont ils avaient besoin, une situation connue comme la précarité énergétique. Le Canada atlantique affiche un taux de précarité énergétique plus élevé (13 %), tout comme beaucoup de collectivités éloignées et de collectivités autochtones. Au moment d'établir une tarification de la pollution causée par le carbone, il faut éviter que les Canadiens à faible revenu se retrouvent encore plus désavantagés. C'est pourquoi, en règle générale, les gouvernements combinent

l'établissement de la tarification de la pollution causée par le carbone avec des crédits d'impôt et des mesures de soutien du revenu.

Parmi les autres mesures clés pour éviter la précarité énergétique, on retrouve des programmes de rénovation, de conservation de l'énergie et de distribution des énergies renouvelables visant les ménages à faible revenu et les collectivités autochtones, ainsi que des programmes de formation en vue d'occuper des postes liés à l'économie propre. Les programmes de conservation réduisent habituellement les coûts pour la société dans son ensemble, car ils réduisent le besoin de capacité de génération¹⁵⁶.

.....

L'augmentation des inégalités a des répercussions importantes à mesure que la société avance vers un avenir à zéro émission. En effet, les personnes à faible revenu ont tendance à produire moins d'émissions que les gens nantis, elles éprouvent des difficultés à payer les coûts liés au logement, à l'alimentation, au transport et à l'énergie et, par conséquent, elles n'ont pas les moyens d'investir dans l'efficacité énergétique. De plus, elles sont plus touchées par le changement climatique que les personnes aisées. Par exemple, les personnes à faible revenu peuvent ne pas avoir la possibilité de payer la climatisation, ou leur logement peut se trouver sur des terres plus vulnérables en cas d'inondation, de sorte que si un événement climatique extrême se produit, elles n'ont pas les moyens de se relever. On constate une division encore plus marquée entre les zones urbaines et rurales du Canada, car les résidents des villes ont accès à des infrastructures de transport public et de transport actif, tandis que les résidents de zones rurales doivent souvent parcourir de longues distances pour accéder aux services publics. Par ailleurs, il faut examiner les effets sur les femmes, les jeunes, les peuples autochtones et les minorités de la réduction de la dépendance de la société sur les combustibles fossiles. À long terme, la mise en place d'une économie à zéro émission nous permettra de bénéficier de politiques qui redresseront les inégalités et renforceront la résilience des différentes collectivités dans un contexte énergétique en évolution¹⁵⁷.

PARTENARIATS AVEC LES PEUPLES AUTOCHTONES

Pour atteindre l'objectif zéro émission, il faut renforcer de façon marquée l'infrastructure canadienne en matière d'énergie propre, notamment au moyen de parcs éoliens, de grands projets d'exploitation d'énergie solaire, de projets hydroélectriques au fil de l'eau, d'une production accrue de biocarburants ou de l'élargissement du réseau électrique. Beaucoup de ces projets auront des répercussions sur les territoires traditionnels des peuples autochtones; ainsi, leur succès ne sera assuré que si les droits et les intérêts des peuples autochtones sont respectés et les avantages des projets, partagés. Les endroits où les projets seront mis en œuvre doivent être choisis en collaboration avec les peuples autochtones, dans le respect de leurs importantes valeurs culturelles et spirituelles et en assurant la protection de l'utilisation traditionnelle des ressources, notamment à l'égard des pêcheries¹⁵⁸.



Comme il est décrit dans le rapport *Powering Prosperity* de l'Assemblée des Premières Nations :

Un pourcentage important des nouveaux projets potentiels de génération d'électricité au Canada se trouve dans les territoires traditionnels des Premières Nations, et les activités associées à la production d'énergie propre pourraient avoir des effets sur l'utilisation du sol par les Premières Nations. La plupart des projets de production d'énergie propre actuellement préparés ou envisagés se trouvent sur des terres de la Couronne et, par conséquent, l'approbation des Premières Nations est requise (accès à l'énergie hydroélectrique, branchement au réseau électrique, extraction et collecte de ressources, etc.)¹⁵⁹. [traduction libre]

Les peuples autochtones du Canada sont particulièrement vulnérables aux changements que subissent leurs territoires traditionnels par suite du changement climatique. Beaucoup d'entre eux ont exprimé un intérêt marqué vers un passage à l'énergie propre au sein de leurs collectivités, particulièrement ceux qui utilisent actuellement du diesel coûteux et polluant pour la production d'énergie. En 2019, 70 % des 279 collectivités éloignées du Canada utilisent du diesel polluant et inefficace pour produire de l'énergie, et près des deux tiers d'entre elles sont des collectivités autochtones¹⁶⁰. Au-delà de la fiabilité accrue et de la réduction des coûts qu'elles offrent, l'énergie renouvelable et la conservation d'énergie sont vues comme des stratégies de développement économique et comme des moyens de renforcer le bien-être et la fierté de la collectivité. Sans surprise, la participation autochtone à l'économie basée sur l'énergie propre augmente de façon constante¹⁶¹.

Pour réussir la transition, l'énergie propre doit être planifiée, développée et gérée de manière à...

- respecter les droits et les territoires des peuples autochtones, l'obligation de consulter, le titre ancestral et la Déclaration des Nations Unies sur les droits des peuples autochtones;
- favoriser la participation des peuples autochtones aux projets de production d'énergie, en plus d'assurer leur droit de propriété partielle des projets, pour qu'ils puissent profiter d'une partie des bénéfices à long terme;
- répondre aux besoins énergétiques des collectivités autochtones et à leurs aspirations d'autonomie (p. ex., sécurité énergétique, fourniture d'énergie propre fiable et abordable pour abandonner progressivement les réseaux électriques alimentés au diesel, amélioration de l'efficacité énergétique du parc résidentiel);
- fournir aux peuples autochtones un accès équitable à l'éducation, à la formation et à l'emploi;
- respecter les approches autochtones locales en matière de développement économique (p. ex., accent mis sur un vaste partage des bénéfices) tout en favorisant la diversification économique;
- accorder la priorité à la réhabilitation des terres endommagées par l'extraction et l'utilisation de combustibles fossiles;
- favoriser une gouvernance collaborative et l'établissement d'ententes de gestion conjointe.

Conclusion : que signifie l'atteinte de l'objectif zéro pour le système énergétique canadien?

Nous avons examiné des études sur la décarbonisation réalisées au Canada et dans le monde entier, et avons cerné dix stratégies pour atteindre l'objectif de zéro émission au pays. Ces études indiquent qu'une réduction importante des émissions est possible tout en maintenant notre qualité de vie. S'il est vrai que la transition exigera un effort considérable de la part de l'industrie, des gouvernements et des Canadiens, les résultats de la modélisation indiquent qu'en règle générale, les ménages et les entreprises feront face à des coûts gérables, particulièrement dans la mesure où une efficacité énergétique accrue et une production plus propre procureront une série de bénéfices indirects, notamment sur le plan de la santé et de l'amélioration de la qualité de l'air. Des sources d'énergie et de combustible plus propres créent également moins de contamination de l'air, de l'eau et du sol que les solutions de rechange¹⁶².

« [...] Les résultats de nos dernières analyses suggèrent que les coûts marginaux associés à la décarbonisation profonde diminuent rapidement. En effet, les coûts marginaux pour 2050 dans le rigoureux scénario 80P sont significativement inférieurs à ceux évalués il y a seulement quelques années dans le cadre du PTAE pour un scénario moins ambitieux... [ce qui] indique, à la fois à quel point les changements technologiques rapides peuvent modifier le coût de la transition et comment le Canada pourrait agir rapidement pour s'assurer d'en profiter et d'y contribuer. »

– Perspectives énergétiques canadiennes

Le passage des combustibles fossiles à une énergie plus propre offre également des possibilités d'innovation technologique, de nouveaux emplois et de nouvelles perspectives économiques dans le secteur en croissance des technologies propres. Alors que certaines entreprises, comme les fabricants de chaudières, pourraient être confrontées à une diminution des ventes et des revenus si elles ne s'adaptent pas aux changements, d'autres, comme les fabricants de thermopompes, constateront une croissance rapide sur le plan des occasions.

Pour atteindre l'objectif de réduire les émissions de GES de façon marquée, il

faut établir des politiques maintenant et réorienter les investissements du côté de l'économie propre. Les retards seront coûteux. Les centrales de production d'énergie, les chaudières industrielles, les bâtiments, les infrastructures de transport et la machinerie lourde ont de longues durées de vie : en effet, certains des éléments de matériel et des centrales construits en 2020 fonctionneront encore en 2050. Si les investissements dans des infrastructures ou équipements produisant un volume important de GES se poursuivent, le coût pour atteindre les objectifs climatiques du Canada augmentera.

La lutte contre le changement climatique est l'un des plus grands défis auxquels l'humanité se trouve confrontée, et le chemin à parcourir peut sembler plein d'embûches, mais jusqu'à présent, le Canada a déjà remporté quelques victoires pour ce qui est du passage vers une économie plus propre :

- En 2002, l'Ontario a décidé de fermer ses centrales au charbon. La dernière d'entre elles a été fermée en 2014, ce qui a entraîné la plus grande réduction des émissions enregistrée en Amérique du Nord, soit l'équivalent du retrait de sept millions de véhicules du réseau routier.
- En 2008, la Colombie-Britannique a interdit la construction de nouvelles centrales électriques alimentées par des combustibles fossiles, défini des exigences en matière de combustibles de source renouvelable et à faibles émissions en carbone, et établi une tarification de la pollution causée par le carbone, ce qui a grandement stimulé le secteur de la technologie propre de la province et démarré la transition vers une économie à faibles émissions en carbone.
- En 2014, la centrale électrique de Boundary Dam, en Saskatchewan, est devenue la première centrale du monde à réduire ses émissions au moyen de la technologie de capture et stockage de carbone.
- En 2016, la Nouvelle-Écosse a réussi à réduire ses émissions de 20 % par rapport aux niveaux de 1990 en investissant dans les énergies renouvelables, l'efficacité et les thermopompes.
- En 2017, la première vente aux enchères concurrentielle d'énergie renouvelable de l'Alberta a établi un nouveau record au chapitre des énergies renouvelables à faible coût, assurant une capacité de 600 MW à 3,7 ¢/kWh, soit moins que le coût d'une usine de traitement de gaz moderne.
- Malgré la croissance démographique et économique, les plus grandes villes du Canada ont réduit leurs émissions de GES : Toronto (-33 % de 1990 à 2016), Montréal (-23 % de 1990 à 2014) et Vancouver (-7 % de 2007 à 2017).
- La génération d'électricité solaire et éolienne est passée de 0,2 % de la production totale en 2005 à 5,9 % en 2016.
- En 2019, Vancouver, Regina, Victoria, Saanich, Nelson, Charlottetown et le comté d'Oxford se sont engagés à atteindre un objectif de 100 % d'énergie renouvelable d'ici 2050 et élaborent des stratégies pour atteindre cet objectif.

Des entreprises canadiennes ouvrent la voie à la transition vers une économie faible en carbone

ACCÉLÉRER LA TRANSITION VERS L'ÉNERGIE PROPRE

La société **Morgan Solar**, établie dans le nouveau centre de haute technologie de Stockyard District à Toronto, a mis au point trois produits révolutionnaires sur le marché pour rendre la technologie solaire plus efficace et plus accessible : SimbaX, une technologie à concentration faible pour les panneaux solaires à grande échelle; SPOTlight, une technologie photovoltaïque translucide intégrée aux bâtiments; et Savanna Tracker, un système de suivi sans fondation¹⁶³.

En Saskatchewan, la société **Deep Earth Energy Production Corp.**¹⁶⁴ met en place des installations géothermiques évolutives à partir de puits forés à l'aide de la technologie de forage de pétrole et de gaz classique (le puits le plus profond jamais foré de la province). Lorsque des couches de roches chaudes sont atteintes, de la vapeur est produite pour actionner une turbine qui produit en continu de l'électricité à zéro émission. À partir d'un projet pilote d'une capacité de production de 5 MW, l'entreprise prévoit passer à 100 MW.

ÉLECTRIFIER PRESQUE TOUT

Fondée en 2009 et établie à Richmond, en Colombie-Britannique, **Corvus Energy** est un fabricant de systèmes modulaires de batteries conçus pour une utilisation dans des environnements marins, notamment pour alimenter les navires et les grues portuaires électriques à batterie ou électriques hybrides. Le premier traversier électrique à batteries au monde, baptisé Ampere, a été mis en service en 2015 et utilise des batteries de Corvus Energy. Ses coûts ont ainsi été réduits de 80 % et ses émissions de 95 %¹⁶⁵.

Depuis 2015, un parc éolien d'une capacité de 9,2 MW dans les Territoires du Nord-Ouest, à **la mine de diamants Diavik**, a contribué à réduire l'utilisation de diesel de 5,2 millions de litres chaque année. Les pales d'éolienne dotées de la technologie de dégivrage peuvent fonctionner à des températures aussi basses que -40 °C¹⁶⁶.

LIBÉRER L'INDUSTRIE DES ÉMISSIONS

En 2018, Rio Tinto et Alcoa, deux importants producteurs canadiens d'aluminium établis au Québec, ont formé une coentreprise appelée **Elysis** dans le but de commercialiser une nouvelle technologie qui élimine toutes les émissions de GES généralement produites par la fusion de l'aluminium traditionnelle¹⁶⁷. L'entreprise a reçu du soutien financier des gouvernements du Québec et du Canada. Les activités de recherche et développement se dérouleront dans la région du Saguenay Lac-Saint-Jean, au Québec. Cette technologie, qui sera commercialisée en 2024, pourrait éventuellement réduire les émissions du Canada de 6,5 millions de tonnes.

Fondée en 2007 et établie à Halifax, **CarbonCure**¹⁶⁸ permet de moderniser les cimenteries existantes au moyen d'une technologie qui injecte du dioxyde de carbone dans le béton au fur et à mesure qu'il est mélangé. Le CO₂ se minéralise (en carbonate de calcium solide), rendant le béton plus durable tout en réduisant son empreinte carbone. Plus de 300 000 chargements de camion de béton de CarbonCure ont déjà été utilisés dans des projets de construction.

PASSER AUX CARBURANTS RENEUVELABLES

Établie à Squamish, en Colombie-Britannique, **Carbon Engineering** commercialise une technologie qui permet de capter directement le CO₂ présent dans l'atmosphère (technologie DAC). Le carbone capturé est ensuite synthétisé en un combustible qui utilise de l'hydrogène provenant de l'électrolyse au moyen d'électricité produite à partir de sources renouvelables pour créer des combustibles synthétiques. Comme ces carburants sont dérivés du carbone atmosphérique, ils offrent la perspective de réduire l'empreinte carbone dans le secteur des transports où l'utilisation de batteries ne convient pas vraiment, comme les vols long-courriers et le camionnage longue distance. La technologie de l'entreprise est viable du point de vue commercial grâce à la tarification de la pollution causée par le carbone et à l'établissement de normes sur les combustibles propres¹⁶⁹.

En vue de faciliter davantage la transition, il importe de dire que le coût de l'énergie renouvelable a continué à baisser. En 2018, le coût actualisé de l'électricité provenant d'un projet photovoltaïque à l'échelle commerciale a chuté de 88 % par rapport aux coûts en 2009, tandis que le coût actualisé de l'énergie éolienne a baissé de 69 % entre 2009 et 2018¹⁷⁰. L'amélioration de la situation économique des énergies renouvelables explique pourquoi, en 2017, les ajouts de capacité de production d'électricité renouvelable ont éclipsé les ajouts de capacité de production de combustibles fossiles dans un rapport de 2:1¹⁷¹. De la même façon, la rentabilité du stockage des batteries continue de s'améliorer considérablement, ce qui accroît le déploiement de batteries connectées au réseau. Les innovations se multiplient au chapitre de l'efficacité énergétique, des bâtiments écologiques, de la bioénergie et des véhicules électriques, et les entreprises canadiennes commencent à tirer parti de ces possibilités. Cependant, il appert que dans certains domaines, les travaux de recherche et développement en matière de technologies propres n'ont pas donné les résultats escomptés. Par exemple, les premières évaluations optimistes du rythme auquel les technologies de capture et stockage de carbone auraient dû être déployées ne se sont pas concrétisées¹⁷². La décarbonisation des procédés industriels et du transport international maritime et aérien est très en retard par rapport au rythme nécessaire pour atteindre les objectifs climatiques¹⁷³. Cela souligne la nécessité pour les gouvernements canadiens de créer un contexte politique propice aux investissements qui favorise l'innovation dans les technologies à faibles émissions en carbone.

La collaboration et les partenariats à l'échelle régionale peuvent également contribuer à réduire les coûts. Par exemple, la capacité du Danemark à décarboniser et à devenir un chef de file en matière d'énergie renouvelable est facilitée par la coopération avec la Norvège.

Ainsi, le Danemark a pu utiliser les réservoirs hydroélectriques de la Norvège qui servent à recharger les batteries lorsque le vent est fort et à les décharger lorsque le vent est faible. De même pour le Canada, les connexions au réseau nord-sud sont meilleures que celles qui existent entre les provinces canadiennes. La collaboration régionale rendue possible par plus d'échanges d'électricité à la frontière canado-américaine donne l'occasion de traiter le caractère variable de la production d'énergie renouvelable¹⁷⁴. Le transfert de connaissances permet également d'accélérer la décarbonisation. La ville de Vancouver, par exemple, a partagé son expertise en matière d'élaboration de stratégies d'atténuation et d'énergie renouvelable avec de plus petites municipalités ayant moins de capacité.

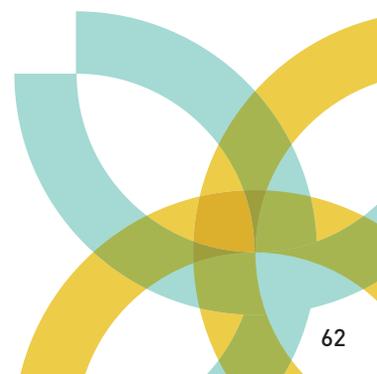
Historiquement, les gouvernements fédéral et provinciaux ont fixé des objectifs de réduction des émissions, mais ne les ont généralement pas atteints. Il est donc nécessaire d'adopter une approche plus efficace pour s'assurer que cette tendance ne se répète pas. Il importe que les objectifs, les mesures et les mécanismes de reddition de comptes fondés sur l'information scientifique soient intégrés aux lois et aux cadres de planification du gouvernement.

Pour cibler les émissions, il faudra un effort coordonné qui va au-delà de la partisanerie¹⁷⁵. Une option à considérer pour améliorer la responsabilisation et dépolitiser la question des réductions d'émissions de carbone serait de créer des organismes crédibles et indépendants aux paliers provincial et fédéral pour surveiller le degré d'atteinte des cibles, évaluer l'efficacité des politiques et recommander des mesures plus strictes dans l'application des politiques, des rabais et de la tarification du carbone. Ainsi, tout comme la Banque du Canada tente d'atteindre une cible d'inflation en contrôlant des paramètres clés comme les taux d'intérêt, une organisation équivalente de « Gestion des émissions Canada » chercherait à ajuster des paramètres comme les prix du carbone pour aider le Canada à respecter son empreinte carbone¹⁷⁶.

Les entreprises ont plus de facilité à prendre des décisions d'investissement lorsque les gouvernements établissent une orientation stratégique claire et que des changements soudains dans les approches réglementaires sont évités. Lorsqu'un changement de gouvernement entraîne des changements radicaux dans la façon dont l'État cherche à réduire les émissions, la certitude pour les entreprises est minée et le climat d'investissement peut se détériorer. Qui plus est, la valeur des investissements du gouvernement précédent dans la décarbonisation peut s'effriter. Plus les objectifs climatiques sont audacieux et plus la politique est claire et crédible, plus les coûts de transition sont faibles¹⁷⁷.

Bien que nous nous soyons concentrés sur le défi urgent que représente la lutte contre les changements climatiques, il faut garder à l'esprit que ce problème doit être traité d'une manière qui contribue à régler d'autres problèmes environnementaux urgents tels que la perte de biodiversité, la contamination de la biosphère et la perturbation d'autres processus naturels comme le cycle de l'azote¹⁷⁸. Il faut des stratégies nationales et mondiales qui répondent à la fois aux priorités environnementales et aux besoins socio-économiques¹⁷⁹.

Alors que la politique climatique se déploie à travers le monde et que des billions de dollars sont investis dans l'économie propre, les trois prochaines décennies seront ponctuées de changements sociaux, économiques et technologiques considérables. Pour réaliser une transition équitable, il est essentiel de trouver des solutions fondées sur la recherche scientifique.



Notes en fin de texte (en anglais seulement)

1. In this report, we use *carbon* (and its absence, decarbonization) as a stand-in for all of the greenhouse gases (carbon dioxide, methane, nitrous oxide, sulphur hexafluoride, perfluorocarbons, hydrofluorocarbons and nitrogen trifluoride).
2. Jason A. Lowe and Daniel Bernie, "The Impact of Earth System Feedbacks on Carbon Budgets and Climate Response," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 376, no. 2119 (2018), <https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0263>; Richard A. Betts et al., "Changes in Climate Extremes, Fresh Water Availability and Vulnerability to Food Insecurity Projected at 1.5°C and 2°C Global Warming with a Higher-Resolution Global Climate Model," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 376, no. 2119 (2018), <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0452>.
3. Elizabeth Bush and Donald S. Lemmen, eds, *Canada's Changing Climate Report* (Ottawa: Government of Canada, 2019).
4. *Paris Agreement* (United Nations, 2015), <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.
5. Government of Canada, "Changes in Temperature," <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/canadian-centre-climate-services/basics/trends-projections/changes-temperature.html>.
6. Valérie Masson-Delmotte et al., eds, "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" (Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2018), <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
7. German National Academy of Sciences Leopoldina, "Negative Emission Technologies: What Role in Meeting Paris Agreement Targets?" European Academies Science Advisory Council (2018), https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Negative_Carbon/EASAC_Report_on_Negative_Emission_Technologies.pdf.
8. Agriculture's non-energy-related emissions amounted to 8.4% of Canada's total emissions in 2017, while waste contributed 2.6%; accounting for land use change and forests would decrease emissions by 3.3%. See <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/greenhouse-gas-emissions/sources-sinks-executive-summary-2019.html#toc4>.
9. Brett Dolter and Peter A. Victor, "Casting a Long Shadow: Demand-based Accounting of Canada's Greenhouse Gas Emissions Responsibility," *Ecological Economics* 127 (2016): 156–64, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.04.013>.
10. DSF acknowledges that hydroelectric plants can have serious effects on river systems, such as increasing the concentration of methyl mercury. Several hydroelectric projects in Canada have been built without adequate consultation with or consent from affected Indigenous communities and rural landowners.

11. There is considerable uncertainty over the role that nuclear power will play in getting emissions to zero and a lack of convergence across decarbonization studies, both in Canada and globally. In part, this is explained by some researchers modelling scenarios that preclude nuclear expansion, due to value orientations or pessimistic assessment of the technology's potential role. This is tied to problems with cost escalation, construction delays and cancellations experienced in many Western countries, compounded by the falling prices of renewables (Amory B. Lovins et al., "Relative Deployment Rates of Renewable and Nuclear Power: A Cautionary Tale of Two Metrics," *Energy Research & Social Science* 38, [2018]: 188–92, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.01.005>). While nuclear power does not generate greenhouse gas emissions on-site at the generation plant and it can help with the integration of variable resources, it creates long-lived radioactive waste that is harmful to the living world and must be disposed of in deep geological repositories (while research is ongoing, no geological repositories have yet been constructed in North America). Nuclear power may prove difficult to deploy in many regions, as it elicits public concern over the risk of accidental release of radioactive materials. Canada's nuclear power sources are aging and even if existing plants are refurbished, current projections suggest a 39 per cent reduction in nuclear capacity by 2037 (compared with 2015 output) unless new reactors are constructed. See J. David Hughes, *Canada's Energy Outlook: Current Realities and Implications for a Carbon-Constrained Future*, Canadian Centre for Policy Alternatives and Parkland Institute (2018).

12. Dave Sawyer and Noel Melton, "The Decarbonized Electrification Pathway: Taking Stock of Canada's Electricity Mix and Greenhouse Gas Emissions to 2030," *EnviroEconomics and Navius Research* (2017).

13. Mark Z. Jacobson, et al., "100% Clean and Renewable Wind, Water, and Sunlight (WWS) All-sector Energy Roadmaps for the 50 United States," *Energy & Environmental Science* 8, no. 7 (2015): 2093–2117;

Mark Z. Jacobson et al., "Low-Cost Solution to the Grid Reliability Problem with 100% Penetration of Intermittent Wind, Water, and Solar for All Purposes," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, no. 49 (2015): 15060–65, <https://doi.org/10.1073/pnas.1510028112>.

14. M Maureen Hand et al., "Renewable Electricity Futures Study" (National Renewable Energy Lab, 2012), <https://www.nrel.gov/analysis/re-futures.html>.

15. Christopher T.M. Clack et al., "Evaluation of a Proposal for Reliable Low-Cost Grid Power with 100% Wind, Water, and Solar," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114, no. 26 (2017): 6722, <https://doi.org/10.1073/pnas.1610381114>; Jesse D. Jenkins, Max Luke and Samuel Thernstrom, "Getting to Zero Carbon Emissions in the Electric Power Sector," *Joule* 2, no. 12 (2018): 2498–2510, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.11.013>; Jesse D. Jenkins and Samuel Thernstrom, "Deep Decarbonization of the Electric Power Sector: Insights from Recent Literature" (2017), <https://www.innovationreform.org/wp-content/uploads/2018/02/EIRP-Deep-Decarb-Lit-Review-Jenkins-Thernstrom-March-2017.pdf>;

Peter J. Loftus et al., "A Critical Review of Global Decarbonization Scenarios: What Do They Tell Us About Feasibility?" Wiley Interdisciplinary Reviews: *Climate Change* 6, no. 1 (2014): 93–112, <https://doi.org/10.1002/wcc.324>; Matthew R. Shaner et al., "Geophysical Constraints on the Reliability of Solar and Wind Power in the United States," *Energy & Environmental Science*, no. 4 (2018), <https://doi.org/10.1039/C7EE03029K>.

16. General Electric, *Pan-Canadian Wind Integration Study* (2016), <https://canwea.ca/wind-integration-study/>.

17. Brett Dolter and Nicholas Rivers, "The Cost of Decarbonizing the Canadian Electricity System," *Energy Policy* 113 (2018): 135–48, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.040>.
18. Dolter and Rivers, "Cost of Decarbonizing," 135–48.
19. GE Energy Consulting, *Western Regional Electricity Cooperation and Strategic Infrastructure (RECSI) Study: Final Report* (Natural Resources Canada, 2018); Hatch Ltd., *Atlantic Regional Electricity Cooperation and Strategic Infrastructure Initiative Final Report* (Nova Scotia Power Inc., 2018).
20. James H. Williams et al., "Deep Decarbonization in the Northeastern United States and Expanded Coordination with Hydro-Québec" (Sustainable Development Solutions Network, Evolved Energy Research and Hydro-Québec, 2018).
21. Martin R. Sers and Peter A. Victor, "The Energy-Emissions Trap," *Ecological Economics* 151 (2018): 10–21, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.004>.
22. Atse Louwen et al., "Re-assessment of Net Energy Production and Greenhouse Gas Emissions Avoidance After 40 Years of Photovoltaics Development," *Nature Communications* 7 (2016): 13728.
23. Timothy G. Walmsley, Michael R.W. Walmsley and Martin J. Atkins, "Energy Return on Energy and Carbon Investment of Wind Energy Farms: A Case Study of New Zealand," *Journal of Cleaner Production* 167 (2017): 885–95, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.040>.
24. Marco Raugei et al., "Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for Photovoltaic Solar Systems in Regions of Moderate Insolation: A Comprehensive Response," *Energy Policy* 102 (2017): 377–84, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.12.042>.
25. Charles A.S. Hall, Jessica G. Lambert and Stephen B. Balogh, "EROI of Different Fuels and the Implications for Society," *Energy Policy* 64 (2014): 141–52, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>.
26. Marco Raugei and Enrica Leccisi, "A Comprehensive Assessment of the Energy Performance of the Full Range of Electricity Generation Technologies Deployed in the United Kingdom," *Energy Policy* 90 (2016): 46–59, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.12.011>.
27. Sers and Victor, "The Energy-Emissions Trap."
28. Findings from both Canadian and global decarbonization studies converge on a much greater use of clean electricity, even as aggressive energy-efficiency measures are implemented.
29. McKinsey suggests a threshold price of US\$50/MWh or less (Source: McKinsey & Company, "Decarbonization of Industrial Sectors: The Next Frontier," 2018).
30. Environment and Climate Change Canada, "Canada's Mid-Century Long-Term Low-Greenhouse Gas Development Strategy" (2016): 34, http://publications.gc.ca/collections/collection_2017/eccc/En4-291-2016-eng.pdf.
31. Dunskey Energy Consulting, "The Economic Impact of Improved Energy Efficiency in Canada" (2018), <https://www.energycanada.org/wp-content/uploads/2018/04/Economic-Impact-of-Pan-Canadian-Framework-Energy-Efficiency.pdf>.
32. Adrian E. Raftery et al., "Less Than 2°C Warming by 2100 Unlikely," *Nature Climate Change* 7 (2017): 637–41, <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate3352>.

33. World Bank data from <https://data.worldbank.org/indicator/ny.gdp.mktp.kd.zg>.
34. Environment and Climate Change Canada, "Canada's Mid-Century Strategy," 30.
35. Masson-Delmotte et al., "Global Warming," Summary for Policymakers.
36. Environment and Climate Change Canada, "Canada's Mid-Century Strategy," 43.
37. WSP, "A Roadmap for Retrofits in Canada: Charting a Path Forward for Large Buildings," Canada Green Building Council (2018).
38. Dunsky Energy Consulting, "The Economic Impact of Improved Energy Efficiency in Canada: Employment and Other Economic Outcomes from the Pan-Canadian Framework's Energy Efficiency Measures," Clean Energy Canada (2018), http://cleanenergycanada.org/wp-content/uploads/2018/04/TechnicalReport_EnergyEfficiency_20180403_FINAL.pdf; Jessica Grove-Smith et al., "Standards and Policies for Very High Energy Efficiency in the Urban Building Sector Towards Reaching the 1.5°C Target," 1.5°C Climate Change and Urban Areas special issue, *Current Opinion in Environmental Sustainability* 30 (2018): 103–14, <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.04.006>.
39. Ralph D. Torrie, Christopher Stone and David B. Layzell, "Understanding Energy Systems Change in Canada: 1. Decomposition of Total Energy Intensity," *Energy Economics* 56 (2016): 101–6, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.03.012>.
40. Chris Bataille et al., "The Need for National Deep Decarbonization Pathways for Effective Climate Policy," *Climate Policy* 16, sup. 1 (2016): S7–S26, <https://doi.org/10.1080/14693062.2016.1173005>.
41. Sven Teske, ed., *Achieving the Paris Climate Agreement Goals: Global and Regional 100% Renewable Energy Scenarios with Non-energy GHG Pathways for +1.5°C and +2°C* (Springer, 2019): section 8.1.1.
42. Fridolin Krausmann et al., "From Resource Extraction to Outflows of Wastes and Emissions: The Socioeconomic Metabolism of the Global Economy, 1900–2015," *Global Environmental Change* 52, (2018): 131–40, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.07.003>.
43. Willi Haas et al., "How Circular Is the Global Economy?: An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005," *Journal of Industrial Ecology* 19, no. 5 (2015): 765–77, <https://doi.org/10.1111/jiec.12244>.
44. Elsa A. Olivetti and Jonathan M. Cullen, "Toward a Sustainable Materials System," *Science* 360, no. 6396 (2018): 1396, <https://doi.org/10.1126/science.aat6821>.
45. Sam Mitra, "Depletion, Technology, and Productivity Growth in the Metallic Minerals Industry," *Mineral Economics* 32, no. 1 (2019): 19–37, <https://doi.org/10.1007/s13563-018-0165-8>.
46. Kate Scott et al., "Bridging the Climate Mitigation Gap with Economy-Wide Material Productivity," *Journal of Industrial Ecology* (2018), <https://doi.org/10.1111/jiec.12831>.
47. Note that in some circular-economy discussions, there is insufficient attention paid to accounting for the energy requirements of closing material loops, remanufacturing and recycling.
48. Natural Resources Canada, *Energy Fact Book 2018–2019* (2018): 36.
49. For space heating/cooling, hot water and appliances (e.g., switch from gas ranges to electricity).

50. Ganesh Doluweera, Hossein Hosseini and Alpha Sow, "Greenhouse Gas Emissions Reductions in Canada through Electrification of Energy Services," Canadian Energy Research Institute (2017), https://ceri.ca/assets/files/Study_162_Full_Report.pdf.
51. K. Dean Edwards, Robert M. Wagner and Ronald L. Graves, "Identification of Potential Efficiency Opportunities in Internal Combustion Engines Using a Detailed Thermodynamic Analysis of Engine Simulation Results," SAE International (2008), <https://doi.org/10.4271/2008-01-0293>.
52. German National Academy of Sciences Leopoldina, "Decarbonisation of Transport: Options and Challenges (EASAC policy report 37)," European Science Academies Science Advisory Council (2019), <https://easac.eu/publications/details/decarbonisation-of-transport-options-and-challenges/>.
53. The Williston reservoir has a 39.4-million-cubic-metre live storage capacity and with a flow of 1,968 m³/s will generate 2,700 MW through the GM Shrum generating station. Source: email communication from Rick Hendriks, Camerado Energy, April 22, 2019. This calculation does not account for environmental constraints or other operational considerations.
54. Phil Carroll, "Are Gas-Fired Peaking Plants on the Way Out?" Finley Engineering (2018), <http://finleyusa.com/wp-content/uploads/2018/03/Are-Gas-Fired-Peaking-Plants-on-the-Way-Out.pdf>; Pablo Ralon et al., "Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030," International Renewable Energy Agency (2017).
55. Alexander E. MacDonald et al., "Future Cost-Competitive Electricity Systems and Their Impact on US CO₂ Emissions," *Nature Climate Change* 6 (2016): 526–31, <http://dx.doi.org/10.1038/NCLIMATE2921>.
56. GE Energy Consulting, *Western Regional Electricity Cooperation*; Hatch Ltd., *Atlantic Regional Electricity Cooperation*.
57. Chris Bataille et al., "A review of Technology and Policy Deep Decarbonization Pathway Options for Making Energy-Intensive Industry Production Consistent with the Paris Agreement," *Journal of Cleaner Production* 187 (2018): 960–73, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.107>.
58. Christoph Böhringer, Jared C. Carbone and Thomas F. Rutherford, "Unilateral Climate Policy Design: Efficiency and Equity Implications of Alternative Instruments to Reduce Carbon Leakage," The Role of Border Carbon Adjustment in Unilateral Climate Policy: Results from EMF 29 special issue, *Energy Economics* 34 (2012): S208–17, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.09.011>.
59. Chris Bataille et al., "A Review of Technology and Policy," 960–73.
60. These technologies are documented in the supplementary data attached to Bataille et al., "A Review of Technology and Policy."
61. Bataille et al., "A Review of Technology and Policy," 10.
62. Steven J. Davis et al., "Net-zero Emissions Energy Systems," *Science* 360, no. 6396 (2018), <https://doi.org/10.1126/science.aas9793>.
63. Samir Huseynov and Marco A. Palma, "Does California's Low Carbon Fuel Standards Reduce Carbon Dioxide Emissions?" *PLOS ONE* 13, no. 9 (2018), e0203167, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203167>.

64. Justin Lepitzki and Jonn Axsen, "The Role of a Low Carbon Fuel Standard in Achieving Long-Term GHG Reduction Targets," *Energy Policy* 119 (2018): 423–40, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.03.067>.
65. David Pimentel and Tad W. Patzek, "Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower," *Natural Resources Research* 14, no. 1 (2005): 65–76, <https://doi.org/10.1007/s11053-005-4679-8>.
66. G. Philip Robertson et al., "Cellulosic Biofuel Contributions to a Sustainable Energy Future: Choices and Outcomes," *Science* 356, no. 6345 (2017), eaal2324, <https://doi.org/10.1126/science.aal2324>.
67. Desirée J. Immerzeel et al., "Biodiversity Impacts of Bioenergy Crop Production: A State-of-the-Art Review," *Bioenergy* 6, no. 3 (2014): 183–209.
68. M.R. Schmer et al., "Net Energy of Cellulosic Ethanol from Switchgrass," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105, no. 2 (2008): 464, <https://doi.org/10.1073/pnas.0704767105>.
69. Michael Abraha et al., "Carbon Debt of Field-Scale Conservation Reserve Program Grasslands Converted to Annual and Perennial Bioenergy Crops," *Environmental Research Letters* 14, no. 2 (2019), 024019, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafc10>.
70. Gunther Glenk and Stefan Reichelstein, "Economics of Converting Renewable Power to Hydrogen," *Nature Energy* 4, no. 3 (2019): 216–22, <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0326-1>.
71. Sonal Singh et al., "Hydrogen: A Sustainable Fuel for Future of the Transport Sector," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51 (2015): 623–33.
72. Hydrogen can be stored using different molecular forms, each involving their own processes and technical requirements for synthesis, transportation, storage and energy release. The leading contenders include methane (CH₄), ammonia (NH₃), methanol (CH₃OH) and methylcyclohexane (CH₃C₆H₁₁). Source: Robert Huggins, *Energy Storage* (Springer: 2010); Alexander Tremel et al., "Techno-Economic Analysis for the Synthesis of Liquid and Gaseous Fuels Based on Hydrogen Production via Electrolysis," *International Journal of Hydrogen Energy* 40, no. 35 (2015): 11457–64, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.097>; Davis et al., "Net-Zero Emissions," 1–9.
73. David W. Keith et al., "A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere," *Joule* 2, no. 8 (2018): 1573–94, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>.
74. Bataille et al., "National Deep Decarbonization Pathways," S7–S26.
75. Len Coad et al., *The Cost of a Cleaner Future: Examining the Economic Impacts of Reducing GHG Emissions* (Ottawa: Conference Board of Canada, 2017); Matthew R. Johnson et al., "Comparisons of Airborne Measurements and Inventory Estimates of Methane Emissions in the Alberta Upstream Oil and Gas Sector," *Environmental Science & Technology* 51, no. 21 (2017): 13008–17, <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03525>.
76. TEFP scenarios 1, 2, 4, 5, 7 and 8 involve increasing oil and gas production; scenarios 1a, 3a and 8a entail less production than forecasted by the NEB.
77. National Energy Board, *Canada's Energy Future 2016: Energy Supply and Demand Projections to 2040* (2016), <https://www.neb-one.gc.ca/nrg/ntgrtd/ftr/2016/2016nrgftr-eng.pdf>.
78. Masson-Delmotte et al., "Global Warming 1.5 °C," 154.
79. Teske, ed., *Paris Climate Agreement Goals*.

80. Statistics Canada, "Flows and Stocks of Fixed Non-Residential Capital, by Sector of Industry and Type of Asset, Canada (x 1,000,000)," Table: 34-10-0163-01 (formerly CANSIM 031-0009) (2019).
81. National Energy Board, "Market Snapshot: Natural Gas Plays an Important Role in Alberta's Oil Sands," <https://www.neb-one.gc.ca/nrg/ntgrtd/mrkt/snpsht/2017/04-03ntrlgslbrtlnsd-eng.html>.
82. Environment and Climate Change Canada, "National Inventory Report 1990–2016: Greenhouse Gas Sources and Sinks in Canada" (2018), http://publications.gc.ca/collections/collection_2018/eccc/En81-4-2016-1-eng.pdf.
83. Emmaline Atherton et al., "Mobile Measurement of Methane Emissions from Natural Gas Developments in Northeastern British Columbia, Canada," *Atmospheric Chemistry and Physics* 17, no. 20 (2017): 12405–20, <https://doi.org/10.5194/acp-17-12405-2017>; Johnson et al., "Comparisons of Airborne Measurements," 13008–17;
- Jian-Xiong Sheng et al., "A High-Resolution (0.1° × 0.1°) Inventory of Methane Emissions from Canadian and Mexican Oil and Gas Systems," *Atmospheric Environment* 158 (2017): 211–15, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.02.036>.
84. Government of Canada, "Greenhouse Gas Emissions," <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/environmental-indicators/greenhouse-gas-emissions.html>.
85. National Energy Board, "Canada's Energy Future 2018: Energy Supply and Demand Projections to 2040" (2018), <https://www.neb-one.gc.ca/nrg/ntgrtd/ftr/2018/2018nrgftr-eng.pdf>.
86. Shell, "Shell Scenarios: Sky—Meeting the Goals of the Paris Agreement" (2018), <http://www.shell.com/skyscenario>.
87. Shell, "Shell Scenarios."
88. Adam R. Brandt et al., "Climate-Wise Choices in a World of Oil Abundance," *Environmental Research Letters* 13, no. 4, 044027 (2018), <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaae76>; Mohammad S. Masnadi et al., "Global Carbon Intensity of Crude Oil Production," *Science* 361, no. 6405 (2018): 851, <https://doi.org/10.1126/science.aar6859>; Christophe McGlade and Paul Ekins, "The Geographical Distribution of Fossil Fuels Unused When Limiting Global Warming to 2°C," *Nature* 517 (2015): 187.
89. Natural Resources Canada, Refinery Economics (webpage), <https://www.nrcan.gc.ca/energy/crude-petroleum/4561>, <https://www.oilsandsmagazine.com/technical/properties>; Adam R. Brandt, "Variability and Uncertainty in Life Cycle Assessment Models for Greenhouse Gas Emissions from Canadian Oil Sands Production," *Environmental Science & Technology* 46, no. 2 (2012): 1253–61, <https://doi.org/10.1021/es202312p>; Pierre Gosselin et al., "Environmental and Health Impacts of Canada's Oil Sands Industry" (Ottawa: Royal Society of Canada, 2010): 438.
90. "Oil Price Differentials Explained: Why Alberta Crude Sells at a Deep Discount," *Oil Sands Magazine* (2018), <https://www.oilsandsmagazine.com/market-insights/crude-oil-pricing-differentials-why-alberta-crude-sells-at-deep-discount-to-wti>.
91. Peter Erickson et al., "Effect of Subsidies to Fossil Fuel Companies on United States Crude Oil Production," *Nature Energy* 2, no. 11 (2017): 891–98, <https://doi.org/10.1038/s41560-017-0009-8>; Peter Erickson, *Confronting Carbon Lock-in: Canada's Oil Sands* (Seattle, WA: Stockholm Environment Institute, 2018); Office of the Auditor General of Canada, *Report 7: Fossil Fuel*

- Subsidies* (2017), http://www.oag-bvg.gc.ca/internet/English/parl_oag_201705_07_e_42229.html; Yanick Touchette and Philip Gass, "Public Cash for Oil and Gas: Mapping Federal Fiscal Support for Fossil Fuels," International Institute for Sustainable Development (2018).
92. McGlade and Ekins, "Geographical Distribution," 187.
93. Mark Jaccard, James Hoffele and Torsten Jaccard, "Global Carbon Budgets and the Viability of New Fossil Fuel Projects," *Climatic Change* 150, no. 1–2 (2018): 15–28.
94. McGlade and Ekins, "Geographical Distribution," 187; Brandt et al., "Climate-Wise Choices."
95. Thus, a gas-fired rotary kiln built in 1985 with a 40-year lifespan would be replaced in 2025 with one fuelled by electricity, hydrogen or biofuels.
96. Christopher J. Smith et al., "Current Fossil Fuel Infrastructure Does Not Yet Commit Us to 1.5°C Warming," *Nature Communications* 10, no. 1 (2019): 101, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07999-w>.
97. Fergus Green and Richard Denniss, "Cutting with Both Arms of the Scissors: The Economic and Political Case for Restrictive Supply-Side Climate Policies," *Climatic Change* (2018) <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2162-x>; Peter Erickson and Michael Lazarus, "Impact of the Keystone XL Pipeline on Global Oil Markets and Greenhouse Gas Emissions," *Nature Climate Change* 4 (2014): 778; Peter Erickson, Michael Lazarus and Georgia Piggot, "Limiting Fossil Fuel Production as the Next Big Step in Climate Policy," *Nature Climate Change* 8, no. 12 (2018): 1037–43. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0337-0>.
98. Teske, ed., *Paris Climate Agreement Goals*.
99. Jean-Francois Mercure et al., "Macroeconomic Impact of Stranded Fossil Fuel Assets," *Nature Climate Change* 8, no. 7 (2018): 588–93, <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0182-1>.
100. Sarah Wolf et al., "Framing 1.5°C: Turning an Investment Challenge into a Green Growth Opportunity" (2019), <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3324509>.
101. Nicholas Stern, *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cabinet Office and HM Treasury (2006): vi.
102. Marshall Burke, W. Matthew Davis and Noah S. Diffenbaugh, "Large Potential Reduction in Economic Damages Under UN Mitigation Targets," *Nature* 557, no. 7706 (2018): 549–53, <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0071-9>; Simon Dietz et al., "The Economics of 1.5°C Climate Change," *Annual Review of Environment and Resources* 43 (2018): 455–80.
103. National Round Table on the Environment and the Economy, *Paying the Price: The Economic Impacts of Climate Change for Canada*, Vol. 4, 2011.
104. Ben Caldecott, ed., *Stranded Assets and the Environment: Risk, Resilience and Opportunity* (Routledge, 2018); Irene Monasterolo and Luca De Angelis, "Are Financial Markets Pricing Carbon Risks after the Paris Agreement? An Assessment of Low-Carbon and Carbon-Intensive Stock Market Indices," Vienna University of Economics and Business (2018), <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3298298>.
105. Mark Carney and Michael Bloomberg, "How to Make a Profit from Defeating Climate Change," *The Guardian*, Dec. 14, 2016, <https://www.theguardian.com/commentisfree/2016/dec/14/bloomberg-carney-profit-from-climate-change-right-information-investors-deliver-solutions>.

106. Céline Bak, *Leveraging Sustainable Finance Leadership in Canada: Opportunities to Align Financial Policies to Support Clean Growth and a Sustainable Canadian Economy* (Winnipeg, MB: International Institute for Sustainable Development, 2019).
107. Tom Harrison et al., *Not Long Now: Survey of Fund Managers' Responses to Climate-Related Risks Facing Fossil Fuel Companies* (UK Sustainable Investment and Finance Association, 2018), <http://uksif.org/wp-content/uploads/2018/04/UKSIF-Not-Long-Now-Survey-report-2018.pdf>.
108. Corinne Le Quéré et al., "Drivers of Declining CO₂ Emissions in 18 Developed Economies," *Nature Climate Change* 9, no. 3 (2019): 213–17, <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0419-7>.
109. Brian Murray and Nicholas Rivers, "British Columbia's Revenue-Neutral Carbon Tax: A Review of the Latest 'Grand Experiment' in Environmental Policy," *Energy Policy* 86 (2015): 674–83, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.08.011>.
110. Nicholas Rivers and Brandon Schaufele, "Salience of Carbon Taxes in the Gasoline Market," *Journal of Environmental Economics and Management* 74 (2015): 23–36, <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2015.07.002>.
111. Akio Yamazaki, "Jobs and Climate Policy: Evidence from British Columbia's Revenue-Neutral Carbon Tax," *Journal of Environmental Economics and Management* 83 (2017): 197–216, <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2017.03.003>.
112. Dale Beugin et al., *Clearing the Air: How Carbon Pricing Helps Canada Fight Climate Change* (Montreal: Canada's Ecofiscal Commission, 2018), <http://ecofiscal.ca/wp-content/uploads/2018/04/Ecofiscal-Commission-Carbon-Pricing-Report-Clearing-the-Air-April-4-2018.pdf>.
113. Elizabeth Beale et al., *Provincial Carbon Pricing and Competitiveness Pressures: Guidelines for Business and Policymakers* (Canada's Ecofiscal Commission, 2015), <http://www.ecofiscal.ca/wp-content/uploads/2015/11/Ecofiscal-Commission-Carbon-Pricing-Competitiveness-Report-November-2015.pdf>.
114. See for example Dolter and Victor, "Casting a Long Shadow."
115. Paola Rocchi et al., "Border Carbon Adjustments Based on Avoided Emissions: Addressing the Challenge of Its Design," *Ecological Economics* 145 (2018): 126–36, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.08.003>.
116. Aaron Cosbey et al., "Developing Guidance for Implementing Border Carbon Adjustments: Lessons, Cautions, and Research Needs from the Literature," *Review of Environmental Economics and Policy* 13, no. 1 (2019): 3–22, <https://doi.org/10.1093/reep/rey020>.
117. Len Coad et al., *Cost of a Cleaner Future*.
118. Under the *Act*, provinces and territories that don't have their own scheme for pricing carbon pollution are subject to the federal backstop.
119. Environment and Climate Change Canada, "Pricing Pollution: How It Will Work" (2018), <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/pricing-pollution-how-it-will-work.html>.
120. Alberta's carbon tax was in effect at time of writing; due to a recent change in government, the future of this tax is uncertain. The new minister of environment and parks has been tasked with drafting the Carbon Tax Repeal Act (<https://www.alberta.ca/jason-nixon-bio.aspx>).
121. Yanick Touchette and Philip Gass, "Public Cash."

122. Sarah M Jordaan and Katherine Konschnik, "Measuring and Managing the Unknown: Methane Emissions from the Oil and Gas Value Chain," CD Howe Institute (2019), https://www.cdhowe.org/sites/default/files/attachments/research_papers/mixed/final%20E-Brief_288_Web.pdf; Jan Gorski and Duncan Kenyon, *Policy Briefing: Achieving Methane Reductions through Carbon Pricing in Alberta* (Pembina Institute, 2018).
123. Daniel Sperling and Sonia Yeh, "Toward a Global Low Carbon Fuel Standard," *Transport Policy* 17, no. 1 (2010): 47–49, <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2009.08.009>.
124. Ibid.
125. Huseynov and Palma, "California's Low Carbon Fuel Standards."
126. Mark Jaccard, Mikela Hein and Tiffany Vass, *Is Win-Win Possible?* Sustainable Canada Dialogues (2016).
127. Mobility Pricing Independent Commission, *Metro Vancouver Mobility Pricing Study: Findings and Recommendations for an Effective, Farsighted, and Fair Mobility Pricing Policy* (2018), https://www.itstimv.ca/uploads/1/0/6/9/106921821/mpic_commission_report_-_final_-_digital_version.pdf.
128. Ibid.
129. Mark Jaccard, "Want an Effective Climate Policy? Heed the Evidence," *Policy Options* (2016); Jaccard, Hein and Vass, *Is Win-Win Possible?*
130. *Supporting Carbon Pricing: How to Identify Policies That Genuinely Complement an Economy-Wide Carbon Price*, Canada's Ecofiscal Commission (2017), <http://ecofiscal.ca/wp-content/uploads/2017/06/Ecofiscal-Commission-Report-Supporting-Carbon-Pricing-June-2017.pdf>.
131. "Population Size and Growth in Canada: Key Results from the 2016 Census," *The Daily* (Statistics Canada, 2017), <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/170208/dq170208a-eng.pdf>.
132. Lars B. Christiansen et al., "International Comparisons of the Associations between Objective Measures of the Built Environment and Transport-Related Walking and Cycling: IPEN Adult Study," *Journal of Transport & Health* 3, no. 4 (2016): 467–78.
133. Alex Boston, *Growing Smarter: Cornerstones for Highly Prosperous, Low Carbon Communities* (Real Estate Foundation of BC, 2017), <http://www.refbc.com/sites/default/files/SGTF-Growing-Smarter.pdf>.
134. Alex Boston (Boston Consulting), *Local Low Carbon Agenda for National Prosperity*, Trottier Energy Futures Project (2015).
135. Natalie Mueller et al., "Health Impact Assessment of Active Transportation: A Systematic Review," *Preventive Medicine* 76 (2015): 103–14, <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2015.04.010>; Meghan Winters, Ralph Buehler and Thomas Götschi, "Policies to Promote Active Travel: Evidence from Reviews of the Literature," *Current Environmental Health Reports* 4, no. 3 (2017): 278–85, <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0148-x>.
136. Boston, *Local Low Carbon Agenda*, 58.
137. Brett Zuehlke, Mark Jaccard and Rose Murphy, *Can Cities Really Make a Difference? Case Study of Vancouver's Renewable City Strategy*, Energy and Materials Research Group, School of Resource and Environmental Management, Simon Fraser University (2017), http://remain.rem.sfu.ca/papers/jaccard/ZuehlkeJaccardMurphy-Vancouver_Renewables_Report-

- [March%202017](#). Jonn Axsen and Michael Wolinetz, "Reaching 30% Plug-In Vehicle Sales by 2030: Modeling Incentive and Sales Mandate Strategies in Canada," *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 65 (2018): 596–617, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.09.012>; Noel Melton et al., *Canada's ZEV Policy Handbook*, Sustainable Transportation Action Research Team (START), Simon Fraser University and Metcalf Foundation (2017): https://www.metcalffoundation.com/wp-content/uploads/2017/12/ZEV-Policy-Handbook_Web.pdf.
138. Michael James Fell, "Energy Services: A Conceptual Review," *Energy Research & Social Science* 27 (2017): 129–40, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.02.010>.
139. Arnulf Grubler et al., "A Low Energy Demand Scenario for Meeting the 1.5°C Target and Sustainable Development Goals Without Negative Emission Technologies," *Nature Energy* 3 (2018): 515–27, <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0172-6>.
140. Ibid.
141. Raftery et al., "2°C warming."
142. Peter A. Victor, *Managing Without Growth: Slower by Design, Not Disaster*, 2nd ed. (Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing, 2019).
143. Tim Jackson, *Prosperity without Growth: Foundations for the Economy of Tomorrow* (Routledge, 2017).
144. See for instance Victor, *Managing Without Growth*; Jackson, *Prosperity Without Growth*; Daniel W. O'Neill et al., "A Good Life for All within Planetary Boundaries," *Nature Sustainability* 1, no. 2 (2018): 88.
145. Tim Jackson and Peter Victor, "Productivity and Work in the 'Green Economy': Some Theoretical Reflections and Empirical Tests," *Environmental Innovation and Societal Transitions* 1, no. 1 (2011): 101–108, <https://doi.org/10.1016/j.eist.2011.04.005>.
146. Ana Poças Ribeiro et al., "What Influences Consumption? Consumers and Beyond: Purposes, Contexts, Agents and History," *Journal of Cleaner Production* 209 (2019): 200–215, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.103>.
147. John F. Helliwell, "Well-Being, Social Capital and Public Policy: What's New?" *The Economic Journal* 116, no. 510 (2006): C34–C45, <https://doi.org/10.1111/j.1468-0297.2006.01074.x>.
148. Ida Kubiszewski et al., "Beyond GDP: Measuring and Achieving Global Genuine Progress," *Ecological Economics* 93 (2013): 57–68.
149. *How Are Canadians Really Doing? The 2016 CIW National Report* (Waterloo: Canadian Index of Wellbeing, 2016).
150. Elsa Dominish et al., "Just Transition: Employment Projections for the 2.0°C and 1.5°C Scenarios," in Teske, ed., *Paris Climate Agreement Goals*.
151. Georgia Piggot et al., *Realizing a Just and Equitable Transition Away from Fossil Fuels* (Stockholm Environment Institute, 2019); James J. Patterson et al., "Political Feasibility of 1.5°C Societal Transformations: The Role of Social Justice," Sustainability Governance and Transformation special issue, *Current Opinion in Environmental Sustainability* 31 (2018): 1–9, <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.11.002>.
152. Hassan Yussuff et al., *Final Report by the Task Force on Just Transition for Canadian Coal Power Workers and Communities* (Government of Canada, 2019).

153. Ibid.
154. Guillermo Montt et al., “Does Climate Action Destroy Jobs? An Assessment of the Employment Implications of the 2-Degree Goal,” *International Labour Review* 157, no. 4 (2018): 519–56, <https://doi.org/10.1111/ilr.12118>.
155. Transition planning should seek to identify a community’s development priorities and consider ways to mitigate industry closure effects on culture and identity.
156. Dianne Saxe, *Making Connections: Straight Talk about Electricity in Ontario*, Environmental Commissioner of Ontario (2018).
157. Burke, Davis and Diffenbaugh, “Large Potential Reduction”; Patterson et al., “Political Feasibility”; Sonja Klinsky and Harald Winkler, “Building Equity In: Strategies for Integrating Equity into Modelling for a 1.5°C World,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 376, no. 2119 (2018), <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0461>.
158. Judith Lipp and Sarah Bale, “Growing Indigenous Power: A Review of Indigenous Involvement & Resources to Further Renewable Energy Development Across Canada” (Toronto: TREC Renewable Energy Co-op, 2018), http://www.trec.on.ca/wp-content/uploads/2018/03/TREC-PPP_IndigenousPowerReport_FINAL.pdf.
159. Powering Prosperity: Working to Build on the Potential of Energy Projects & Partnerships (Assembly of First Nations, 2013): 11.
160. Dave Lovekin and Dylan Heerema, “Diesel, Renewables, and the Future of Canada’s Remote Communities: Introduction to Microgrids,” Pembina Institute (2019), <https://www.pembina.org/blog/remote-microgrids-intro>.
161. Robert D. Stefanelli et al., “Renewable Energy and Energy Autonomy: How Indigenous Peoples in Canada Are Shaping an Energy Future,” *Environmental Reviews* 27, no. 1 (2019): 95–105, <https://doi.org/10.1139/er-2018-0024>.
162. Peter Berrill et al., “Environmental Impacts of High Penetration Renewable Energy Scenarios for Europe,” *Environmental Research Letters* 11, no. 1 (2016), <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/1/014012>; Edgar G. Hertwich et al., “Integrated Life-Cycle Assessment of Electricity-Supply Scenarios Confirms Global Environmental Benefit of Low-Carbon Technologies,” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, no. 20 (2015): 6277, <https://doi.org/10.1073/pnas.1312753111>.
163. <https://morgansolar.com/>
164. <https://deepcorp.ca>
165. <https://electrek.co/2018/02/03/all-electric-ferry-cuts-emission-cost/>
166. https://www.riotinto.com/ourcommitment/spotlight-18130_19357.aspx
167. <https://www.elysis.com/en>
168. <https://www.carboncure.com/>
169. <https://carbonengineering.com/>
170. Lazard, *Lazard’s Levelized Cost of Energy Analysis: Version 12.0* (2018), <https://www.lazard.com/media/450784/lazards-levelized-cost-of-energy-version-120-vfinal.pdf>; UNEP, Bloomberg New Energy Finance and Frankfurt School—UNEP Collaborating Centre for

Climate & Sustainable Energy Finance, *Global Trends in Renewable Energy Investment 2018* (New York, 2018), https://www.frankfurt-school.de/dam/jcr:33eb8fb1-6c0b-4340-8177-262fbc343744/17278NEF_Visual-6.pdf.

171. Nina Chestney and Alister Doyle, "Renewables Grew Twice as Fast as Fossil Fuels in 2017," World Economic Forum (2018), <https://www.weforum.org/agenda/2018/04/renewables-grew-twice-as-fast-as-fossil-fuels-in-2017>.

172. Mai Bui et al., "Carbon Capture and Storage (CCS): The Way Forward," *Energy & Environmental Science* 11, no. 5 (2018): 1062–1176, <https://doi.org/10.1039/C7EE02342A>.

173. "Tracking Clean Energy Progress," International Energy Agency (2019), <https://www.iea.org/tcep/>.

174. James H. Williams et al., "Deep Decarbonization in the Northeastern United States and Expanded Coordination with Hydro-Québec: A report of the Sustainable Development Solutions Network in Cooperation with Evolved Energy Research and Hydro-Québec" (New York: United Nations Sustainable Development Solutions Network, 2018).

175. Thad Kousser and Bruce Tranter, "The Influence of Political Leaders on Climate Change Attitudes," *Global Environmental Change* 50 (2018): 100–109, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.03.005>; Elinor Ostrom, *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action* (Cambridge: Cambridge University Press, 1991).

176. Jaccard, Hein and Vass, *Is Win-Win Possible?*

177. Chris Bataille, David Sawyer, Noel Melton, *Pathways to Deep Decarbonization in Canada*, SDSN and IDDRI (2015), http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_CAN.pdf.

178. Johan Rockström et al., "A Safe Operating Space for Humanity," *Nature* 461, no. 7263 (2009): 472–75, <https://doi.org/10.1038/461472a>.

179. Kate Raworth, "A Doughnut for the Anthropocene: Humanity's Compass in the 21st Century," *The Lancet Planetary Health* 1, no. 2 (2017): e48–e49, [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(17\)30028-1](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(17)30028-1).

Annexe

Forme abrégée	Auteurs et commanditaires	Nom de l'étude	Année	Secteurs	Région géographique	Horizon temporel	Méthodologie
CANADA							
PEC	Langlois-Bertrand, Vaillancourt, Bahn et autres/ Institut de l'énergie Trottier, e3Hub, ESMIA	Perspectives énergétiques canadiennes	2018	À l'échelle de l'économie	Canada	2050	Modélisation
ARECSI	Hatch/Ressources naturelles Canada	Initiative de collaboration régionale et d'infrastructure stratégique de l'électricité (RECSI) Canada atlantique	2018	Énergie électrique	Canada atlantique	Non précisé	Modélisation
WRECSI	GE Energy Consulting / Ressources naturelles Canada	Initiative de collaboration régionale et d'infrastructure stratégique de l'électricité (RECSI) Région de l'Ouest	2018	Énergie électrique	Provinces de l'Ouest	2030 et 2040	Modélisation
REC	Potvin, Burch, Layzell et autres. Dialogues pour un Canada vert/Ressources naturelles Canada	Rebâtir le système énergétique canadien: vers un avenir sobre en carbone	2017	À l'échelle de l'économie	Canada	2050	Synthèse
EDDP	Vaillancourt, Bahn, Frenette et Sigvaldason	Exploring Deep Decarbonization Pathways to 2050 for Canada Using an Optimization Energy Model Framework	2017	À l'échelle de l'économie	Canada	2050	Modélisation
CCF	Coad, Gibbard, Macdonald et Stewart/ Conference Board du Canada	The Cost of a Cleaner Future: Examining the Economic Impacts of Reducing GHG Emissions	2017	À l'échelle de l'économie	Canada	2050	Modélisation (répercussions économiques)
PTAE	L'Académie canadienne du génie, la Fondation David Suzuki, la Fondation familiale Trottier	Projet Trottier pour l'avenir énergétique: Défis et opportunités pour le Canada	2016	À l'échelle de l'économie	Canada	2050	Modélisation
IWWP	Jaccard, Hein et Vass	Is a Win-Win Possible? Can Canada's Government Achieve Its Paris Commitment... and Get Re-Elected?	2016	À l'échelle de l'économie	Canada	2020–2030 à 2050	Modélisation
PCWIS	GE Energy Consulting	Étude pancanadienne sur l'intégration de l'éolien	2016	Énergie électrique	Canada	2025	Modélisation
CMCS	Gouvernement du Canada	Stratégie canadienne de développement à faible émission de gaz à effet de serre à long terme pour le milieu du siècle	2016	À l'échelle de l'économie	Canada	2050	Synthèse
CAVRE	Conseil canadien sur l'énergie renouvelable	L'avantage canadien: une vision pour l'électricité renouvelable au Canada	2016	Énergie électrique	Canada	2050	Synthèse
DDPP	Bataille, Sawyer et Melton SDSN/IDDRI	Pathways to Deep Decarbonization in Canada	2015	À l'échelle de l'économie	Canada	2050	Modélisation

ACC	Potvin, Aitken, Anctil et autres/Dialogues pour un Canada vert, Institut Trottier pour la science et la politique publique	Agir sur les changements climatiques: les solutions d'universitaires canadiens et canadiennes	2015	À l'échelle de l'économie	Canada	2050	Synthèse
TPOLEES	Conseil des académies canadiennes	Solutions technologiques et politiques pour un système énergétique à faibles émissions au Canada	2015	À l'échelle de l'économie	Canada	Non précisé	Synthèse
NRTREE	Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie	Définir notre avenir: vers une économie faible en carbone	2012	À l'échelle de l'économie	Canada	2050	Modélisation

É.-U.

DDNEUS	Williams, Jones, Kwok et Haley/Evolved Energy Research et Hydro-Québec	Deep Decarbonization in the Northeastern United States and Expanded Coordination with Hydro-Québec	2018	À l'échelle de l'économie	Nord-est des États-Unis	2050	Modélisation
GCRSWP	Shaner, Davis, Lewis et Caldeira	Geophysical Constraints on the Reliability of Solar and Wind Power in the US	2018	Énergie renouvelable	États-Unis	s.o.	Modélisation
ACEF	Gowrishankar et Levin/NRDC	America's Clean Energy Frontier: The Pathway to a Safer Climate Future	2017	À l'échelle de l'économie	États-Unis	2050	Modélisation
USMCS	Gouvernement des États-Unis	United States Mid-Century Strategy for Deep Decarbonization	2016	À l'échelle de l'économie	États-Unis	2050	Modélisation
PDDUS	Williams, Haley, Kahrl et Moore	Pathways to Deep Decarbonization in the United States	2015	À l'échelle de l'économie	États-Unis	2050	Modélisation

UE

100REEU	Zappa, Junginger et van den Broek	Is a 100% Renewable European Power System Feasible by 2050?	2019	À l'échelle de l'économie	UE	2050	Modélisation
OEUES	Capros, Kannavou, Evangelopoulou et autres	Outlook of the EU Energy System up to 2050	2018	À l'échelle de l'économie	UE	2050	Modélisation
EPTLCES	Hainsch, Burandt, Kemfert et autres	Emission Pathways Towards a Low-Carbon Energy System for Europe: A Model-Based Analysis of Decarbonization Scenarios	2018	À l'échelle de l'économie	UE	2050	Modélisation
CPFA	Commission européenne	Une planète propre pour tous - Une vision européenne stratégique à long terme pour une économie prospère, moderne, compétitive et neutre pour le climat	2018	À l'échelle de l'économie	UE	2050	Modélisation

MONDIAL

APAG	Teske (rédacteur en chef)	"Achieving the Paris Agreement Goals: Global and Regional 100% Renewable Energy Scenarios with Non-energy GHG Pathways for +1.5°C and +2°C"	2019	À l'échelle de l'économie	Mondial	2050	Modélisation
------	---------------------------	---	------	---------------------------	---------	------	--------------

GESRE	Ram, Bogdanov, Aghahosseini et autres	Global Energy System Based on 100% Renewable Energy: Power, Heat, Transport and Desalination Sectors	2019	À l'échelle de l'économie	Mondial	2050	Modélisation
Sky	Shell International	Sky: Meeting the Goals of the Paris Agreement	2018	À l'échelle de l'économie	Mondial	2070	Modélisation
IPPC1.5	Intergovernmental Panel on Climate Change (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat ou « GIEC »)	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	2018	À l'échelle de l'économie	Mondial	2100	Modélisation
DCS	Harvey, Orvis et Rissman	Designing Climate Solutions: A Policy Guide for Low-Carbon Energy	2018	À l'échelle de l'économie	Mondial	2050	Modélisation
GZCEEPS	Jenkins, Luke et Thernstrom	Getting to Zero Carbon Emissions in the Electric Power Sector	2018	Énergie électrique	Mondial	2050	Synthèse
PET	Agence internationale de l'énergie/Agence internationale pour les énergies renouvelables	Perspectives for the Energy Transition	2017	À l'échelle de l'économie	Mondial	2050	Modélisation
ETP	Agence internationale de l'énergie	Energy Technologies Perspectives 2017: Catalysing Energy Technology Transformations	2017	À l'échelle de l'économie	Mondial	2060	Modélisation
RRD	Rockstrom, Gaffney, Rogelj et autres	A Roadmap for Rapid Decarbonization	2017	À l'échelle de l'économie	Mondial	2050	Synthèse
BEGP	Energy Transitions Commission	Better Energy, Greater Prosperity: Achievable Pathways to Low-Carbon Energy Systems	2017	À l'échelle de l'économie	Mondial	2040	Modélisation
ER	Greenpeace International, Global Wind Energy Council, SolarPower Europe	Energy [R]evolution: A Sustainable World Energy Outlook 2015	2015	À l'échelle de l'économie	Mondial	2050	Modélisation
BGBC	Commission mondiale sur l'économie et le climat	Better Growth, Better Climate: The New Economy Report	2014	À l'échelle de l'économie	Mondial	2050	Synthèse

AUTRES RÉGIONS

ARE2030	Aghahosseini, Bogdanov, Barbosa et Breyer	Analysing the Feasibility of Powering the Americas with Renewable Energy and Inter-regional Grid Interconnections by 2030	2019	Énergie électrique	Amériques	2030	Modélisation
PRA	Ison, Lyons et Atkinson/ Repower Australia	A Plan to Repower Australia: 100 % Clean Energy	2019	À l'échelle de l'économie	Australie	2050	Synthèse

SECTORIEL

DDPEII	Bataille, Åhman, Neuhoff et autres	A Review of Technology and Policy Deep Decarbonization Pathway Options for Making Energy-Intensive Industry Production Consistent with the Paris Agreement	2018	Industrie	Mondial	2035-60	Synthèse
MP	Energy Transitions Commission	Mission Possible: Reaching Net-Zero Carbon Emissions from Harder-to-Abate Sectors by Mid-Century	2018	Industrie, transport lourd et matériaux	Mondial	2050	Modélisation
SFEC	Favier, De Wolf, Scrivener et Habert	A Sustainable Future for the European Cement and Concrete Industry: Technology Assessment for Full Decarbonisation of the Industry by 2050	2018	Ciment et béton	Europe	2050	Modélisation

