



## SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES ET POLITIQUES POUR UN SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE À FAIBLES ÉMISSIONS AU CANADA

Le comité d'experts sur la consommation énergétique et les changements climatiques



Council of Canadian Academies  
Conseil des académies canadiennes

*Le savoir au service du public*



## **SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES ET POLITIQUES POUR UN SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE À FAIBLES ÉMISSIONS AU CANADA**

**Le comité d'experts sur la consommation énergétique  
et les changements climatiques**

## LE CONSEIL DES ACADÉMIES CANADIENNES

180, rue Elgin, bureau 1401, Ottawa (Ontario) Canada K2P 2K3

**Avis :** Le projet sur lequel porte ce rapport a été entrepris avec l'approbation du conseil des gouverneurs du Conseil des académies canadiennes (CAC). Les membres du conseil des gouverneurs sont issus de la Société royale du Canada (SRC), de l'Académie canadienne du génie (ACG) et de l'Académie canadienne des sciences de la santé (ACSS), ainsi que du grand public. Les membres du comité d'experts responsable du rapport ont été choisis par le CAC en raison de leurs compétences spécifiques et dans le but d'obtenir un éventail équilibré de points de vue.

Ce rapport a été préparé pour Magna International Inc. Les opinions, constatations et conclusions présentées dans cette publication sont celles des auteurs, à savoir les membres du comité d'experts sur la consommation énergétique et les changements climatiques, et ne reflètent pas nécessairement les points de vue des organisations où ils travaillent ou auxquelles ils sont affiliés.

### **Le rapport peut être cité comme suit :**

Conseil des académies canadiennes, 2015. *Solutions technologiques et politiques pour un système énergétique à faibles émissions au Canada*, Ottawa, ON, Comité d'experts sur la consommation énergétique et les changements climatiques, Conseil des académies canadiennes.

**Avis de non-responsabilité :** Au meilleur de la connaissance du CAC, les données et les informations tirées d'Internet qui figurent dans le présent rapport étaient exactes à la date de publication du rapport. En raison de la nature dynamique d'Internet, des ressources gratuites et accessibles au public peuvent subséquemment faire l'objet de restrictions ou de frais d'accès, et l'emplacement des éléments d'information peut changer lorsque les menus et les pages Web sont modifiés.

© 2015 Conseil des académies canadiennes

Imprimé à Ottawa, Canada



Council of Canadian Academies  
Conseil des académies canadiennes

## **Le Conseil des académies canadiennes**

### *Le savoir au service du public*

Le Conseil des académies canadiennes (CAC) est un organisme indépendant à but non lucratif qui soutient des évaluations spécialisées indépendantes, étayées scientifiquement et faisant autorité, qui alimentent l'élaboration de politiques publiques au Canada. Dirigé par un conseil des gouverneurs et conseillé par un comité consultatif scientifique, le CAC a pour champ d'action la « science » au sens large, ce qui englobe les sciences naturelles, les sciences humaines et sociales, les sciences de la santé, le génie et les lettres. Les évaluations du CAC sont effectuées par des comités pluridisciplinaires indépendants d'experts provenant du Canada et de l'étranger. Ces évaluations visent à cerner des problèmes nouveaux, des lacunes de nos connaissances, les atouts du Canada, ainsi que les tendances et les pratiques internationales. Ces études fournissent aux décideurs gouvernementaux, aux universitaires et aux parties prenantes l'information de grande qualité dont ils ont besoin pour élaborer des politiques publiques éclairées et innovatrices.

Tous les rapports d'évaluation du CAC sont soumis à un examen formel. Ils sont publiés et mis à la disposition du public sans frais. Des fondations, des organisations non gouvernementales, le secteur privé et tout palier de gouvernement peuvent soumettre au CAC des questions susceptibles de faire l'objet d'une évaluation. Le CAC bénéficie aussi du soutien de ses trois académies membres fondatrices :

**La Société royale du Canada (SRC)** est le principal organisme national regroupant d'éminents scientifiques, chercheurs et gens de lettres au Canada. La SRC a pour objectif premier de promouvoir l'acquisition du savoir et la recherche en arts et en sciences. La Société est composée de près de 2 000 membres, hommes et femmes, choisis par leurs pairs pour leurs réalisations exceptionnelles en sciences naturelles, en sciences sociales, en sciences humaines et dans les arts. La SRC s'attache à reconnaître l'excellence universitaire, à conseiller les gouvernements et les organisations, ainsi qu'à promouvoir la culture canadienne.

**L'Académie canadienne du génie (ACG)** est l'organisme national par l'entremise duquel les ingénieurs les plus chevronnés et expérimentés du Canada offrent au pays des conseils stratégiques sur des enjeux d'importance primordiale. Fondée en 1987, l'ACG est un organisme indépendant, autonome et à but non lucratif. Les membres de l'ACG sont nommés et élus par leurs pairs en reconnaissance de leurs réalisations exceptionnelles et de leurs longs états de service au sein de la profession d'ingénieur. Au nombre d'environ 600, les membres de l'ACG s'engagent à faire en sorte que les connaissances expertes en génie du Canada soient appliquées pour le plus grand bien de tous les Canadiens.

**L'Académie canadienne des sciences de la santé (ACSS)** reconnaît les personnes qui ont à leur actif de grandes réalisations dans le domaine des sciences de la santé au Canada. Fondée en 2004, l'ACSS compte quelque 400 membres et en élit de nouveaux chaque année. L'organisation est dirigée par un conseil d'administration et un comité exécutif bénévoles. La première fonction de l'ACSS consiste à fournir en temps opportun des évaluations éclairées et impartiales sur des questions urgentes qui touchent la santé des Canadiens et des Canadiennes. L'ACSS surveille également les événements mondiaux reliés à la santé, afin d'améliorer l'état de préparation du Canada en la matière, et assure une représentation du pays en sciences de la santé sur le plan international. L'ACSS fait autorité au nom de la collectivité multidisciplinaire des sciences de la santé.

[www.sciencepourlepublic.ca](http://www.sciencepourlepublic.ca)

@scienceadvice

## **Le comité d'experts sur la consommation énergétique et les changements climatiques**

**Keith W. Hipel, MSRC, FACG, coprésident**, professeur, génie de la conception des systèmes, Université de Waterloo (Waterloo, Ont.)

**Paul R. Portney, coprésident**, ancien professeur d'économie, Université de l'Arizona; ancien président, Resources for the Future (Santa Barbara, CA)

**F. Michael Cleland**, consultant privé (Ottawa, Ont.)

**Debra J. Davidson**, professeure de sociologie de l'environnement, Département d'économie des ressources et de sociologie environnementale, Université de l'Alberta (Edmonton, Alb.)

**Eddy Isaacs, FACG**, chef de la direction, Alberta Innovates – Energy and Environment Solutions (Calgary, Alb.)

**Mark Jaccard, MSRC**, professeur, École de gestion des ressources et de l'environnement, Université Simon Fraser (Vancouver, C.-B.)

**Vicky Sharpe**, membre du conseil d'administration et agrégée supérieure, Institut international du développement durable (IIDD) (Toronto, Ont.)

**Sara Jane Snook, FACG**, ingénieure-conseil indépendante (Halifax, N.-É.)

## Message des coprésidents

Les données probantes disponibles affirment clairement que le climat de la Terre est en train de changer, que ces changements sont causés par les émissions de gaz à effet de serre (GES) produites par l'activité humaine et que sans une réduction importante de ces émissions, l'ampleur et le rythme des changements climatiques feront courir de graves risques à la planète. Selon le comité d'experts, que ce soit au Canada ou dans le monde en général, les risques posés par l'évolution du climat justifient le déploiement d'efforts soutenus et accélérés pour réduire les émissions de GES au cours des décennies à venir. Il s'agit d'un immense défi qui exige une transformation fondamentale de la société.

Dans les faits, il est possible que l'on exagère la complexité technologique et politique des changements climatiques. Le problème et ses solutions possibles ont été énormément étudiés et sont à présent bien connus, et de plus en plus de technologies et de politiques visant à atténuer les émissions sont mises en œuvre. Guidé par ce constat, le comité d'experts a constitué un sommaire accessible, bien qu'aucunement exhaustif, de la documentation pertinente. Son objectif était de clarifier stratégiquement les problèmes et faire la synthèse des principes reconnus et acceptés par les experts énergétiques et climatiques et étayés par la documentation. Le comité a aussi adopté un point de vue systémique, qui tenait compte de l'interconnectivité de la société et du milieu naturel l'entourant et de l'importance de mettre en évidence les leçons tirées de la conception et de la mise en application des politiques relatives aux changements climatiques partout sur la planète.

Il est évident qu'un avenir où les rejets de GES seraient faibles est possible, mais il dépendra de la volonté collective et de l'ambition des gouvernements fédéral et provinciaux. Le Canada est particulièrement bien outillé pour satisfaire des restrictions draconiennes des émissions de GES, grâce à son abondance de ressources énergétiques naturelles et à son expertise technologique. Selon le comité d'experts, il peut donc opérer une transformation majeure si les politiques adéquates sont mises en place. Les stratégies et les politiques optimales permettant d'atteindre cet objectif devront être adaptatives, afin de suivre les besoins et de répondre à l'évolution des émissions, aux progrès technologiques et aux changements sociaux, économiques et politiques

particuliers. Elles devront également s'appuyer sur des principes systémiques de résilience, de durabilité, d'équité et d'intégration entre les provinces et territoires et entre les disciplines.

À titre de coprésidents, nous sommes extrêmement reconnaissants à nos collègues membres du comité d'experts, qui représentaient un riche éventail de domaines, d'avoir offert leur temps, leurs connaissances, leur sagesse et leur considérable expérience pour faire en sorte que notre rapport soit complet, éclairant, équilibré et d'une qualité générale qui réponde aux normes du Conseil des académies canadiennes (CAC). Les délibérations du comité étaient toujours stimulantes, constructives et utiles à l'avancée du projet et nous avons eu plaisir à voir comment les différentes opinions ont convergé pour atteindre un consensus.

Tout comme nos collègues du comité d'expert, nous sommes très heureux d'avoir eu la possibilité d'analyser cette importante question et en leur nom, nous remercions Magna International Inc. d'avoir demandé cette évaluation au CAC. Nous tenons particulièrement à remercier M. Donald Walker, directeur général, et M. David Mark Pascoe, vice-président à l'Ingénierie et à la Recherche et développement chez Magna International Inc. pour nous avoir expliqué le travail de leur organisation et la motivation de l'évaluation et pour nous avoir orientés sur les manières possibles d'établir le mandat du comité d'experts. Le comité souhaite également remercier les examinateurs du rapport qui ont bénévolement formulé de précieuses suggestions et amélioré la qualité, l'équilibre et l'exhaustivité du travail du comité. Le rapport final n'aurait pas été le même sans leurs conseils avisés.

Enfin, le comité d'experts est extrêmement reconnaissant aux membres du personnel du Conseil des académies canadiennes pour l'extraordinaire soutien à la recherche qu'ils lui ont apporté. Ces personnes ont été des partenaires à part entière dans cette entreprise et méritent d'être reconnues à ce titre.



**Keith W. Hipel, MSRC, FACG,**  
coprésident



**Paul R. Portney,**  
coprésident

Le comité d'experts sur la consommation énergétique  
et les changements climatiques

## **Personnel responsable du projet au Conseil des académies canadiennes**

Équipe de l'évaluation : Andrew Taylor, directeur de programmes  
R. Dane Berry, directeur adjoint de programmes  
Suzanne Loney, associée de recherche  
Kristen Cucan, coordonnatrice de programmes

Avec la participation de : Eve Rickert, Talk Science to Me Inc., révision de l'anglais  
Roma Ilnyckyj, Talk Science to Me Inc.,  
révision de l'anglais  
François Abraham, traducteur agréé,  
Communications Léon, inc.

## Examen du rapport

Ce rapport a été examiné, à l'état d'ébauche, par les personnes mentionnées ci-dessous. Celles-ci ont été choisies par le Conseil des académies canadiennes pour refléter une diversité de points de vue, de domaines de spécialisation et d'origines, dans les secteurs des établissements universitaires, de l'entreprise privée, des politiques et des organisations non gouvernementales.

Ces examinateurs ont évalué l'objectivité et la qualité du rapport. Leurs avis — qui demeureront confidentiels — ont été pleinement pris en considération par le comité d'experts, et un grand nombre de leurs suggestions ont été incorporées dans le rapport. Nous n'avons pas demandé à ces personnes d'approuver les conclusions du rapport, et elles n'ont pas vu la version définitive du rapport avant sa publication. Le comité d'experts qui a effectué l'évaluation et le Conseil des académies canadiennes assument l'entière responsabilité du contenu définitif de ce rapport.

Le CAC tient à remercier les personnes suivantes d'avoir bien voulu examiner le rapport :

**Monica Gattinger**, présidente du Collaboratoire sur les recherches et les politiques énergétiques et professeure agrégée, École d'études politiques, Université d'Ottawa (Ottawa, Ont.)

**Fiona Jones**, directrice générale, Développement durable, Suncor (Calgary, Alb.)

**David B. Layzell, MSRC**, directeur et professeur, programme Canadian Energy Systems Analysis Research (CESAR), Université de Calgary (Calgary, Alb.)

**Richard J. Marceau, FACG**, vice-président à la Recherche, Université Memorial de Terre-Neuve (St. John's, T.-N.-L.)

**David L. McCollum**, chercheur, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) (Laxenburg, Autriche)

**James Meadowcroft**, professeur et titulaire de la chaire de recherche du Canada en gouvernance et développement durable, École de politique publique et d'administration et département de Sciences politiques, Université Carleton (Ottawa, Ont.)

**Nancy Olewiler**, professeure en politique publique, Université Simon Fraser (Vancouver, C.-B.)

**Oskar T. Sigvaldason, FACG**, président, SCMS Global (St. Catharines, Ont.)

La procédure d'examen du rapport a été supervisée, au nom du conseil des gouverneurs et du comité consultatif scientifique du CAC, par **Jean Gray, C.M., MACSS**, professeure émérite de médecine, Université Dalhousie, (Halifax, N.-É.). Son rôle était de veiller à ce que le comité d'experts prenne en considération de façon entière et équitable les avis des examinateurs. Le conseil des gouverneurs du CAC n'autorise la publication du rapport d'un comité d'experts qu'une fois que la personne chargée de superviser l'examen du rapport confirme que le rapport satisfait bien aux exigences du CAC. Le CAC remercie Dre Gray d'avoir supervisé consciencieusement l'examen du rapport.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Janet W. Bax". The signature is stylized and cursive, with a large loop at the end.

**Janet W. Bax**

présidente par intérim, Conseil des académies canadiennes

## Sommaire

Pour qu'une société fonctionne, elle doit disposer d'un système énergétique fiable et grâce à l'amélioration de sa capacité à exploiter l'énergie provenant de plusieurs sources, l'être humain a pu élever son niveau de vie partout sur la planète. Comme de nombreux pays, le Canada dépend essentiellement des combustibles fossiles. Le charbon, le pétrole et le gaz naturel comptent ensemble pour 72 % de son approvisionnement énergétique et sont les principales sources d'énergie employées pour le transport, le chauffage local, de nombreux procédés industriels et la production d'électricité dans certaines provinces. L'utilisation de ces combustibles augmente la quantité de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dans l'atmosphère et provoque des changements généralisés du climat terrestre. Les risques considérables et étendus que cette utilisation fait peser sur la société et sur les écosystèmes justifient le déploiement d'efforts soutenus et accélérés pour réduire les émissions de gaz à effet de serre découlant de l'activité humaine dans les décennies à venir.

Le Conseil des académies canadiennes (CAC) a été chargé de synthétiser les données probantes disponibles sur certaines sources et technologies énergétiques et sur les politiques publiques qui contribueraient à la transition vers un système énergétique à faibles émissions au Canada. Ce mandat répond à la frustration de certains leaders du milieu des affaires face au manque de clarté concernant les faits essentiels sur les changements climatiques et sur les technologies énergétiques et les solutions politiques permettant de les contrer. Pour répondre à sa mission, le CAC a constitué un comité interdisciplinaire de huit experts en économie, en politique publique, en génie et en systèmes et technologies énergétiques. De leurs discussions et de leur examen des données probantes, trois principales constatations se sont dégagées.

### **Constatation 1 : Le Canada doit considérablement réduire ses émissions en adoptant les technologies offertes sur le marché.**

Dans les prochaines décennies, la transition vers un système énergétique à faibles émissions s'effectuerait selon trois stratégies principales : amélioration de l'efficacité énergétique, passage des sources à fortes émissions aux sources à faibles émissions (substitution interénergétique) et, possiblement, adoption de technologies de captage et stockage du carbone (CSC). Améliorer l'efficacité énergétique peut procurer des gains rapides et jeter les bases pour une introduction économique de technologies à faibles émissions. Cependant, la réduction massive des émissions nécessitera le recours à la substitution interénergétique et, éventuellement, au CSC pour accompagner l'usage des

combustibles fossiles. Tirer parti des technologies existantes dans ces domaines pour le transport, le bâtiment et l'industrie permettrait de réduire les émissions à grande échelle. Il existe plusieurs solutions prometteuses à cet égard :

- *Transport* : Gains constants d'efficacité pour tous les véhicules par l'augmentation du recours à l'électricité à faibles émissions pour le transport de voyageurs, l'élargissement de l'utilisation des biocarburants dans le transport de marchandises et l'aménagement urbain et la planification de l'infrastructure de transport à long terme.
- *Bâtiment* : Gains constants d'efficacité dans les nouveaux édifices ou lors de la rénovation, par le passage à l'électricité pour le chauffage local dans les bâtiments fortement écoénergétiques et par l'adoption sélective de systèmes de chauffage communautaire captant et utilisant la chaleur résiduelle ou exploitant des sources d'énergies renouvelables.
- *Industrie* : Gains constants d'efficacité dans les procédés industriels, réduction des émissions fugitives, emploi du CSC dans les procédés industriels adaptés, électrification et meilleure utilisation de la biomasse dans les applications industrielles qui le permettent.

Cependant, étant donné la cherté de ces technologies par rapport aux solutions conventionnelles, il est peu probable qu'elles soient choisies sans la mise en place de politiques strictes et obligatoires. L'innovation et les progrès technologiques seront aussi essentiels pour réduire progressivement les coûts des technologies énergétiques à faibles émissions.

## **Constatation 2 : L'électricité à faibles émissions est la base d'un système énergétique à faibles émissions.**

Le passage à l'électricité à faibles émissions élimine les rejets de CO<sub>2</sub> durant la production d'énergie et contribue également à la réduction des émissions dans transport, le bâtiment et l'industrie, puisque ces secteurs emploient de plus en plus l'électricité comme source d'énergie. De nombreux Canadiens vivent dans des provinces ou territoires qui profitent déjà d'une électricité à faibles émissions. Toutefois, la réduction des émissions dans le futur nécessitera que les provinces qui comptent toujours sur des sources d'électricité polluantes, comme le charbon, effectuent la transition et que toutes les provinces accroissent la production à émissions faibles ou nulles pour faire face à la demande croissante. Cette expansion nécessitera une planification rigoureuse pour davantage intégrer l'électricité tirée de sources renouvelables intermittentes (p. ex. énergie

solaires, énergie éolienne, centrales au fil de l'eau) à une capacité de stockage accrue et aux autres sources d'énergie acheminable (comme l'hydroélectricité, le nucléaire, la géothermie, la biomasse et le charbon ou le gaz naturel avec CSC). Investir dans les lignes de transport d'électricité, les interconnexions et la modernisation des réseaux peut également améliorer la flexibilité et permettre aux technologies de production à faibles émissions de jouer un plus grand rôle. Le coût de ces technologies, même s'il est encore généralement plus élevé que ceux des centrales à combustibles fossiles, baisse rapidement. Étant donnée la relative faiblesse des prix de l'électricité au Canada dans la plupart des provinces et territoires, il est peu probable que le coût de production électrique à partir de sources à faibles émissions constitue un fardeau majeur pour la plupart des consommateurs et des entreprises.

**Constatation 3 : La transition vers un système énergétique à faibles émissions est réalisable si elle est accompagnée d'une combinaison adéquate de politiques strictes de politiques souples.**

Il n'existe pas une politique adéquate unique pour réduire les émissions provenant de la production d'énergie. Cependant, l'expérience a jusqu'ici montré que des mesures volontaires seules sont insuffisantes et que les politiques axées uniquement sur de futurs progrès technologiques n'offrent aucune garantie de réduction des émissions. Des politiques d'émissions strictes, obligatoires et à l'échelle de l'économie sont donc essentielles si le Canada veut réussir la transition de son système énergétique. Les taxes sur le carbone, les systèmes de plafonnement et échange et autres instruments de réglementation sont des approches possibles. Mais quelles que soient les politiques utilisées, certaines caractéristiques de conception peuvent en améliorer l'efficacité à de nombreux égards. On peut par exemple lier ces politiques à des limites d'émissions contraignantes et de plus en plus strictes ou à des prix du carbone contraignants et augmentant constamment, lesquels seraient accompagnés de dispositions de contrôle et de pénalité appropriées. D'autres solutions consistent également à offrir une grande souplesse de conformité, à traiter équitablement les entreprises nouvelles et existantes, à harmoniser les politiques au Canada et à établir des liens internationaux, à compenser les groupes lésés par les politiques (au moins de façon transitoire) ou à inclure le public dans la prise de décision.

En plus de politiques obligatoires, les politiques habilitantes sont extrêmement importantes pour appuyer les réductions d'émissions. Elles comprennent l'investissement gouvernemental direct, l'ajustement des subventions, l'infrastructure d'appui, le soutien à l'innovation et l'amélioration de l'efficacité

des processus réglementaires. De plus, le soutien à l'innovation énergétique peut accélérer l'adoption de technologies à faibles émissions en les rendant plus abordables.

Avec des politiques à l'échelle de l'économie en place, les individus, les entreprises et les autres décideurs peuvent choisir les réponses technologiques et énergétiques qui correspondent à leur contexte et ajuster leur décision avec le temps pour l'adapter aux progrès scientifiques, aux avancées technologiques et aux tendances en matière de réduction des émissions.

## MARCHE À SUIVRE

S'attaquer aux changements climatiques nécessitera en fin de compte une action mondiale coordonnée pour protéger une ressource commune — l'atmosphère terrestre — et demandera que la société soit prête à payer aujourd'hui pour obtenir des résultats dont profiteront essentiellement les générations futures. Par contre, les problèmes technologiques et politiques posés par les changements climatiques peuvent ne pas être aussi complexes que ce qu'on pense souvent. Les conséquences de ces changements et leurs solutions possibles ont été énormément étudiées et sont maintenant bien connues.

Si les transitions de système énergétique exigent normalement plusieurs décennies en raison de la longévité de l'infrastructure et des investissements massifs requis, elles peuvent être accélérées grâce à l'appui de politiques stratégiques; de plus, de telles transitions ont déjà été amorcées dans certaines provinces et certains territoires du Canada. Retarder la transformation augmenterait avec le temps les coûts à déboursier pour atteindre les cibles de réduction des émissions, à cause du risque de rester pris avec de nouvelles installations et une nouvelle infrastructure polluantes que cette décision poserait.

Pour que les transitions s'effectuent dans leur intégralité, il faudra des politiques s'adaptant à l'évolution de la situation économique, technologique et environnementale, et cohérentes dans le temps. Grâce à des politiques strictes et souples, le Canada pourra réduire considérablement les émissions produites par son système énergétique dans les prochaines décennies. Cette transition ne se fera pas sans coûts pour les consommateurs, les entreprises et l'économie dans son ensemble. Toutefois, elle est réalisable sans mettre en péril la croissance économique et la compétitivité à long terme du pays.

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction et mandat du comité d'experts .....</b>	<b>1</b>
1.1	Mandat du comité d'experts .....	4
1.2	Portée de l'évaluation .....	5
1.3	Science des changements climatiques: État des données probantes .....	7
1.4	Le Canada dans le contexte mondial.....	15
1.5	Apperçu du rapport.....	18
<b>2</b>	<b>Comprendre le système énergétique canadien .....</b>	<b>20</b>
2.1	Qu'est-ce qu'un système énergétique?.....	22
2.2	Le système énergétique canadien .....	26
2.3	Émissions de gaz à effet de serre d'origine énergétique du Canada .....	36
2.4	Transitions de système énergétique .....	43
2.5	Résumé.....	46
<b>3</b>	<b>Vers un système énergétique à faibles émissions : solutions énergétiques et technologiques.....</b>	<b>48</b>
3.1	Électricité .....	51
3.2	Transport.....	72
3.3	Bâtiment.....	92
3.4	Industrie.....	98
3.5	Résumé.....	109
<b>4</b>	<b>Politiques publiques concernant les systèmes énergétiques à faibles émissions .....</b>	<b>112</b>
4.1	La nécessité de politiques contraignantes .....	114
4.2	Évaluation des politiques sur les changements climatiques .....	116
4.3	Instruments politiques contraignants .....	119
4.4	Politiques habilitantes .....	136
4.5	Les possibles répercussions économiques de la transition vers un système énergétique à faibles émissions au Canada .....	144
4.6	Résumé.....	147

<b>5</b>	<b>Conclusions .....</b>	<b>149</b>
5.1	Le contexte canadien de réduction des émissions de dioxyde de carbone produites par la consommation d'énergie .....	150
5.2	Les possibilités technologiques de la mise en place d'un système énergétique à faibles émissions au Canada .....	152
5.3	Politiques stimulant la transition vers un système énergétique à faibles émissions .....	156
5.4	En conclusion .....	161
	<b>Références .....</b>	<b>163</b>

# 1

## Introduction et mandat du comité d'experts

- **Mandat du comité d'experts**
- **Portée de l'évaluation**
- **Science des changements climatiques :  
État des données probantes**
- **Le Canada dans le contexte mondial**
- **Apperçu du rapport**

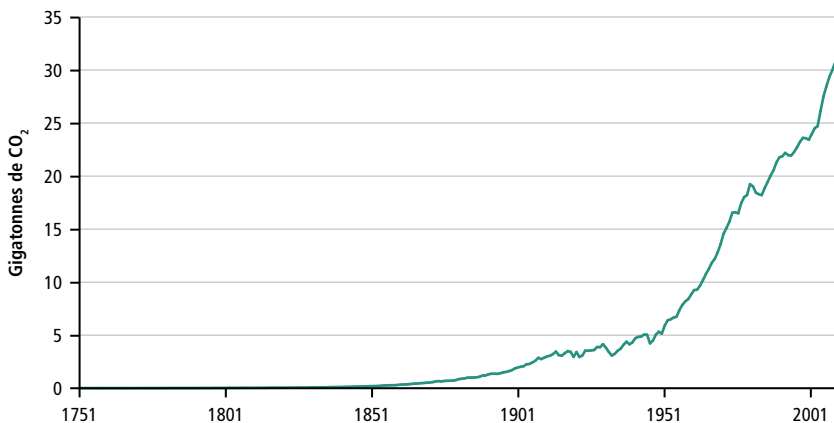
## 1 Introduction et mandat du comité d'experts

Pour qu'une société fonctionne, elle doit disposer d'un système énergétique fiable. L'énergie fait fonctionner nos ordinateurs, éclaire nos maisons, alimente nos réseaux de transport, chauffe nos bâtiments et permet à notre industrie de s'épanouir. L'accès accru à l'énergie a joué un rôle prépondérant dans la considérable amélioration de la qualité de vie que la majeure partie de la planète a connue depuis la révolution industrielle. Il continue à être important pour réduire le fardeau que constitue la misère dans les pays pauvres. Les combustibles fossiles, comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel, ont été essentiels à cette expansion, et ils sont aujourd'hui une source primordiale d'énergie dans le monde, conséquence de leur vaste disponibilité, de leur densité énergétique, de leur facilité de transport et de leur compatibilité avec l'infrastructure existante.

Toutefois, l'emploi de combustibles fossiles est aussi la plus grande source de gaz à effet de serre (GES) produits par l'activité humaine. Il est aujourd'hui responsable de 70 % des émissions de GES mondiales (WRI, 2014). On estime que la combustion du charbon, du pétrole et du gaz naturel a rejeté approximativement 1 300 gigatonnes (milliards de tonnes) de dioxyde de carbone dans l'atmosphère terrestre entre 1751 et 2010, dont approximativement la moitié entre le milieu des années 1980 et aujourd'hui (Boden *et al.*, 2013). Les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone ont donc augmenté au fil du temps et sont à présent 42 % supérieures à ce qu'elles étaient en 1750 (OMM, 2014). Comme l'illustre la figure 1.1, les émissions de dioxyde de carbone causées par l'emploi de combustibles fossiles augmentent de façon quasiment exponentielle et sont à présent d'environ 32 gigatonnes par an. De nombreuses données scientifiques indiquent de façon probante que le climat terrestre change à cause de ces émissions. Les températures moyennes de la planète augmentent (figure 1.2), et les changements du niveau et de l'acidité des océans, du couvert de neige et de glace, des aires de distribution géographique de nombreuses espèces et de la fréquence et de la durée des sécheresses, des vagues de chaleur et des fortes précipitations sont très bien documentés (GIEC, 2013b).

On s'attend à ce que les émissions produites par l'emploi de combustibles fossiles croissent dans les années à venir, parallèlement à l'augmentation de la demande mondiale d'énergie. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) estime qu'au rythme actuel, la demande énergétique planétaire aura augmenté de 37 % en 2040 et que les combustibles fossiles combleront encore les trois quarts des besoins en énergie de la planète dans 25 ans (AIE, 2014d). Sans une combinaison de changements politiques importants, la transition à grande

échelle aux sources d'énergie de substitution ou l'adoption répandue du captage et stockage du carbone (CSC), les émissions mondiales de dioxyde de carbone continueront à croître et les températures planétaires augmenteront encore (GIEC, 2014b).



Source de données : Boden *et al.*, 2013

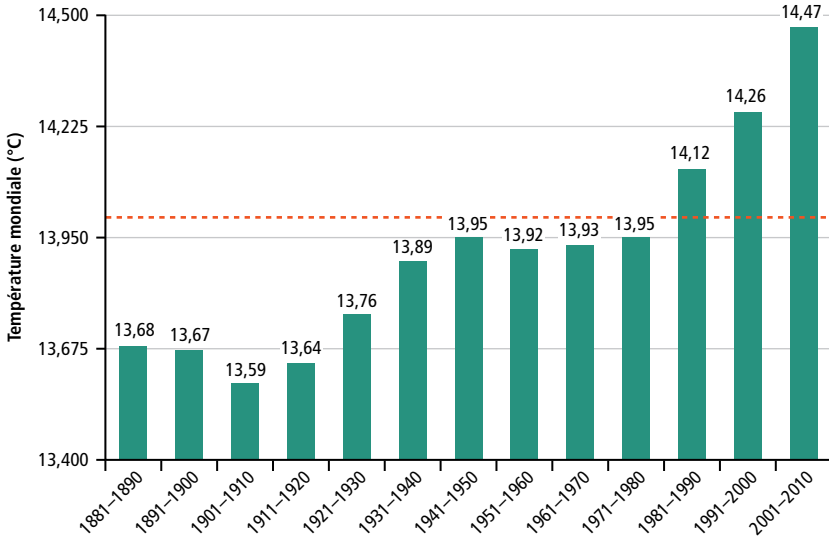
**Figure 1.1**

### Émissions mondiales de dioxyde de carbone dues à l'emploi de combustibles fossiles, 1751–2010

Les émissions annuelles de dioxyde de carbone dues à l'emploi de combustibles fossiles ont constamment augmenté depuis la révolution industrielle et sont à présent d'environ 32 gigatonnes. Les données ne comprennent pas les émissions de source non énergétique (p. ex. production de ciment).

Pour éviter ce scénario et stabiliser le climat à long terme, il faudra passer à un système énergétique — les ressources, les procédés et les technologies inhérents à la production, à la conversion, à la distribution et à l'utilisation de l'énergie — à faibles émissions de gaz à effet de serre qui a, par conséquent, une faible incidence sur le climat terrestre. Un tel système comprend des procédés et des sous-systèmes d'ampleur variée, de la simple automobile à l'intégralité de l'assemblage des dispositifs et de l'infrastructure nécessaires à la production et à la distribution d'électricité. Cette transition demandera de choisir les sources d'énergie et les technologies mises à la disposition de la société. Elle exigera aussi de faire des choix quant aux politiques que les gouvernements pourront utiliser pour soutenir les transformations du système énergétique tout en faisant en sorte que cette transition s'effectue à prix réduit pour la société et tienne compte de l'ensemble des coûts et des bénéfices. Cependant,

en raison de la nature conflictuelle des débats publics sur les changements climatiques, de la complexité des systèmes énergétiques et climatiques et de l'abondance de renseignements parfois contradictoires, il est difficile pour les décideurs, les entreprises et la population de déterminer à quelle information se fier lorsqu'ils cherchent à comprendre ce problème.



Reproduit avec la permission de l'OMM, 2013

Figure 1.2

### Températures décennales moyennes de la surface, 1881–2010

La décennie 2001–2010 a été la plus chaude depuis que la température est enregistrée. La figure illustre les températures moyennes mondiales combinées de la surface et de l'air au-dessus de la terre et à la surface des océans obtenues par moyennage de trois ensembles de données indépendants : Met Office Hadley Centre et Climatic Research Unit, University of East Anglia, au Royaume-Uni (HadCRU); NOAA-National Climatic Data Center (NCDC); et National Aeronautics and Space Administration-Goddard Institute for Space Studies (NASA-GISS), aux États-Unis. La ligne horizontale orange indique la moyenne à long terme entre 1961 et 1990 (14 °C).

## 1.1 MANDAT DU COMITÉ D'EXPERTS

À l'automne 2014, Magna International Inc. a demandé au Conseil des académies canadiennes (CAC) de réaliser une étude sur l'énergie et les changements climatiques. Cette requête était motivée par la frustration croissante chez les leaders du milieu des affaires canadien que cause de la confusion entourant

les technologies énergétiques et les changements climatiques ainsi que les solutions politiques permettant de contrer ces derniers. Magna souhaitait donc commanditer une évaluation qui :

- fournirait un aperçu du système énergétique canadien et définirait les possibilités et les défis associés à la transition à un système à faibles émissions;
- produirait une analyse des différentes sources et technologies énergétiques qui pourraient intervenir dans la transition à un système à faibles émissions, compte tenu de leurs forces et de leurs faiblesses relatives et de leur performance par rapport à des critères économiques, environnementaux et sociaux;
- déterminerait les politiques publiques disponibles pour appuyer le passage à des sources et à des technologies énergétiques à faibles émissions et analyserait les leçons à tirer de l'introduction de telles politiques au Canada et ailleurs dans le monde;
- cernerait en quoi les données probantes peuvent éclairer les décisions touchant les politiques et les investissements qui façonneront le développement du système énergétique canadien dans les décennies à venir.

Le présent projet cherche à réaliser ces objectifs dans un rapport accessible qui servira de guide aux décideurs, aux entreprises et au public, à partir d'une évaluation indépendante rigoureuse des meilleures données probantes disponibles.

Pour répondre à la demande de Magna Inc., le CAC a constitué un comité d'experts multidisciplinaire composé de huit personnes spécialisées en économie, en politiques publiques, en ingénierie, en affaires et en systèmes et procédés énergétiques. Le comité s'est réuni six fois (virtuellement et en personne) en 2014 et 2015 pour examiner les données probantes et réfléchir au mandat. Son rapport a été soumis à un examen attentif par des pairs constitué d'experts en énergie et en changements climatiques du Canada et d'autres pays.

## 1.2 PORTÉE DE L'ÉVALUATION

L'évaluation porte sur les sources d'énergie, les procédés et technologies énergétiques et les politiques publiques susceptibles de favoriser et d'appuyer une transition vers un système énergétique à faibles émissions. Bien que les changements climatiques soient un problème mondial, le rapport du comité d'experts, dont le but est de constituer un résumé accessible des publications, se concentre sur le Canada. Les données probantes sont issues principalement des publications de synthèse récentes parues dans des revues scientifiques examinées par des pairs ou produites par des organismes internationaux indépendants, bien que le comité d'experts ait également étudié des rapports publiés par des gouvernements et d'autres organismes et des études primaires, lorsque cela était nécessaire. Les méthodes de recherche ont varié selon le sujet et ont évolué à la

lumière de la toute dernière information évaluée. Le processus d'examen par des pairs a aussi permis de déceler de nouvelles données probantes pour les délibérations du comité. L'évaluation n'a pas pour ambition d'être exhaustive et ne repose pas sur la recherche primaire. La plupart des sujets abordés dans le rapport, et les données probantes utilisées pour appuyer les discussions, ont été choisis parce qu'ils étaient considérés comme : (i) importants pour la clarification de questions que le public ignore généralement ou qui sont floues pour lui; et (ii) largement compris et acceptés par les experts en énergie et en climat et étayés par des publications. Le comité d'experts s'est également appuyé sur la pensée systémique, reconnaissant le caractère interrelié de la société, des systèmes énergétiques et environnementaux et des différentes solutions technologiques et politiques (Hipel *et al.*, 2007). Le rapport offre un éclairage sur les facteurs systémiques clés qui limitent ou favorisent les possibilités de réduction des émissions dans l'économie et des leçons tirées de l'élaboration et de la mise en œuvre de politiques sur les changements climatiques.

Le mandat du comité d'experts touche de nombreux sujets relatifs à l'énergie, à l'économie, à l'environnement et aux changements climatiques. Cependant, plusieurs domaines ont été dès le départ délibérément exclus de la portée de l'évaluation :

- *Science des changements climatiques.* En dehors des renseignements de base fournis à la section 1.3, l'évaluation ne comporte pas d'examen original des données probantes sur les changements climatiques, car celles-ci ont été abondamment étudiées et analysées ailleurs. Le lecteur recherchant une analyse plus approfondie des données ou souhaitant savoir comment l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre influe sur le système climatique est invité à consulter le *cinquième Rapport d'évaluation du Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat* (GIEC, 2013a). La Royal Society au Royaume-Uni et la National Academies of Science aux États-Unis ont aussi produit un résumé (RS et NAS, 2014) sur la science des changements climatiques.
- *Émissions de gaz à effet de serre d'origine non énergétique.* Les changements d'affectation des terres, l'agriculture, la gestion des déchets et les procédés industriels sont responsables d'environ 30 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre, qu'il s'agisse de dioxyde de carbone ou d'autres substances comme le méthane, l'oxyde nitreux, les hydrofluorocarbones, le tétrafluorure de carbone et l'hexafluorure de soufre. Le comité d'experts s'étant concentré sur les systèmes énergétiques, il n'a pas analysé en détail ces sources d'émissions et les méthodes d'atténuation. Les émissions provenant de l'agriculture sont également exclues en raison de l'importance des émissions non énergétiques dans ce secteur et du fait que les émissions agricoles reliées à l'énergie ne représentent qu'une faible portion (~3 %) des émissions énergétiques totales au Canada.

- *Génie climatique.* À l'exception des technologies bioénergétiques, le comité d'experts n'a pas étudié les procédés d'élimination du dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Il ne s'est pas non plus penché sur les possibilités de technologies et de procédés industriels de séquestration du dioxyde de carbone atmosphérique dans des produits à valeur ajoutée (p. ex. fibre de carbone), même s'ils pourraient en fin de compte jouer un rôle important dans l'atténuation des changements climatiques en constituant une mesure incitative commerciale à cette séquestration. De même, le comité n'a pas étudié la possibilité d'injecter des aérosols dans la stratosphère pour dévier le rayonnement solaire. Ces solutions de génie climatique de grande envergure méritent un examen distinct, car elles posent des risques et des défis différents. Le National Research Council a récemment réalisé des études au sujet de ces difficultés (NRC, 2015a, 2015b).
- *Adaptation climatique.* Les données probantes sur les stratégies et les activités d'adaptation aux changements climatiques ont aussi été exclues de la portée de l'évaluation, car elles mettent l'accent sur l'atténuation. *Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat* (GIEC, 2014c) propose un examen approfondi des données probantes sur les incidences et sur les adaptations climatiques.
- *Négociations internationales sur le climat.* Enfin, le comité d'experts n'a pas étudié les données probantes concernant les négociations internationales sur le climat. Il s'est plutôt concentré sur le système énergétique intérieur du Canada et sur les politiques qui le façonnent.

### 1.3 SCIENCE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES : ÉTAT DES DONNÉES PROBANTES

Les relations entre les gaz à effet de serre atmosphériques, le système climatique et les effets des changements climatiques sur les écosystèmes et les sociétés recouvrent des domaines extraordinairement complexes de la recherche scientifique. Toutefois, les données probantes accumulées au cours des dernières décennies étayaient fortement trois conclusions générales : (i) le climat de la Terre est en train de changer; (ii) les changements observés sont causés principalement par les émissions de gaz à effet de serre issues de l'activité humaine; et (iii) si ces émissions ne sont pas considérablement atténuées, l'ampleur et le rythme des changements climatiques font peser un risque majeur sur les communautés humaines et sur les écosystèmes terrestres.

#### 1.3.1 Observations sur le climat

Il existe un vaste et croissant volume de données probantes documentant les changements du climat terrestre qui surviennent à un rythme sans précédent depuis que l'histoire est consignée. Les changements climatiques se produisent partout dans le monde et touchent tous les éléments du système climatique

mondial, dont le cycle de l'eau, la cryosphère (la partie de la surface terrestre recouverte de glace ou de neige) et les écosystèmes maritimes et terrestres (GIEC, 2013a).

La température de surface augmente sur toute la planète. La décennie de 2001 à 2010 a été la plus chaude depuis les débuts de l'enregistrement météorologique moderne au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle (OMM, 2013) et en 2014, on a enregistré pour la 38<sup>e</sup> année consécutive une température de surface moyenne mondiale supérieure à la moyenne historique à long terme (NOAA, 2015). Cette température augmente tant à la surface de la terre qu'à celle de la mer, sur tous les continents. Dans la plupart des régions du globe, les journées de chaleur sont plus fréquentes et les journées de froid, plus rares (Hartmann *et al.*, 2013). Certains phénomènes météorologiques extraordinaires sont de plus en plus courants, même si la tendance varie d'une région à l'autre. La fréquence des épisodes de fortes précipitations augmente dans certaines parties du monde (comme en Amérique du Nord, en Amérique centrale et en Europe) et les sécheresses sont plus répétitives dans certaines régions (comme en Méditerranée), alors qu'elles le sont moins dans d'autres (en Amérique du Nord et centrale, par exemple) (Hartmann *et al.*, 2013).

Les changements climatiques touchent les océans, qui se réchauffent, voient leur niveau monter et s'acidifient parce qu'ils absorbent davantage de dioxyde de carbone de l'atmosphère (Pörtner *et al.*, 2014). La hausse du niveau des océans est due à la fonte des sources d'eau douce, comme les glaciers et l'inlandsis, à l'expansion de l'eau de mer consécutive à son réchauffement. Le niveau a augmenté de 19 centimètres en moyenne au cours du XX<sup>e</sup> siècle et s'accroît désormais d'environ 3,2 millimètres par an (Pörtner *et al.*, 2014). Ce phénomène n'est cependant pas uniformément réparti autour du monde. Depuis le début des années 1990, certaines régions du Pacifique occidental ont vécu une élévation du niveau de la mer jusqu'à trois fois supérieure à la moyenne mondiale (Church *et al.*, 2013).

Le couvert de glace et de neige s'affaiblit dans de nombreuses régions. L'étendue de la glace de mer dans l'Arctique a diminué chaque saison et chaque décennie depuis 1979 (Vaughan *et al.*, 2013). Il est probable que la réduction du couvert de glace dans l'Arctique accélère la tendance au réchauffement, car la surface de l'océan absorbe alors plus de chaleur que la glace. L'épaisseur de la glace de mer de l'Arctique décroît également; son estimation moyenne en hiver est passée de 3,64 mètres en 1980 à 1,84 mètre en 2008 (Vaughan *et al.*, 2013). Le réchauffement de la température de surface entraîne le recul des glaciers partout sur la planète (WGMS, 2013) et plus de 600 d'entre eux ont disparu durant les dernières décennies (Vaughan *et al.*, 2013). L'inlandsis du Groenland

et de l'Antarctique perd de la masse à un rythme accéléré (Vaughan *et al.*, 2013). L'étendue du couvert neigeux en été dans l'hémisphère Nord chute également, ce qui a des répercussions sur le ruissellement saisonnier et sur la disponibilité de l'eau. Le pergélisol fond dans de nombreuses régions, ce qui pourrait accélérer les changements climatiques à cause de la libération supplémentaire de méthane (Vaughan *et al.*, 2013).

Les changements climatiques ont une incidence sur les écosystèmes et sur les espèces. Des modifications des aires de distribution de plantes et d'espèces animales terrestres et d'eau douce — dont les oiseaux migrateurs, les arbres et autres plantes et les insectes — ont été documentées. Ces aires de distribution s'élèvent en latitude et en altitude en réaction au réchauffement (GIEC, 2014d). En milieu maritime, le glissement vers le nord de la distribution du poisson, des oiseaux de mer et de certains organismes a aussi été observé (Porter *et al.*, 2014). On prévoit que ces changements se poursuivront à mesure que le climat se réchauffera et de nombreuses espèces auront probablement de la difficulté à s'adapter au rythme du réchauffement (Settele *et al.*, 2014).

Nombre de ces bouleversements climatiques ont été constatés au Canada, et leur ampleur est souvent supérieure à la moyenne mondiale. Par exemple, la température de surface y augmente près de deux fois plus rapidement, la température moyenne au-dessus de la terre s'étant accrue de 1,5 °C au cours des 60 dernières années (RNCAN, 2014f). La tendance des précipitations change également au Canada. Les précipitations moyennes augmentent dans la plupart des régions et plusieurs zones du sud du pays ont aussi vécu une transformation de la forme de ces précipitations, avec l'accroissement des chutes de pluie et la baisse des chutes de neige (RNCAN, 2014f). Les glaciers de l'Ouest et de l'Extrême-Arctique diminuent, ceux de l'Alberta ayant perdu 25 % de leur surface entre 1985 et 2005 (RNCAN, 2014f). Dans la majeure partie du pays, en particulier dans l'Ouest, la glace sur les lacs et les rivières a tendance à fondre plus tôt. Ces changements ont des répercussions sur les cycles hydrologiques : le ruissellement plus précoce au printemps peut accroître les risques d'inondation, alors que la réduction du manteau neigeux en hiver diminue la disponibilité de l'eau de surface en été et augmente la variabilité du débit d'eau. Les espèces et les écosystèmes canadiens réagissent aussi à la variation de la température par la modification de leurs aires traditionnelles de distribution. Les érables, par exemple, se sont notablement déplacés vers le nord depuis 1971 (Woodall *et al.*, 2009; RNCAN, 2014f).

### 1.3.2 Causes des changements climatiques

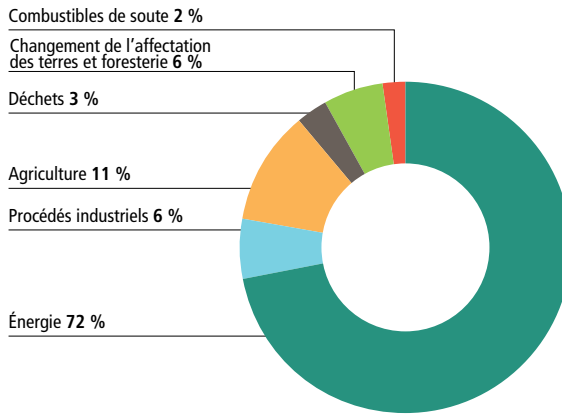
Les données probantes scientifiques disponibles indiquent que l'augmentation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre conséquence de l'activité humaine est la principale cause des changements actuels du climat terrestre; elle est probablement responsable de plus de la moitié de la hausse de la température de surface moyenne mondiale entre 1951 et 2010 (GIEC, 2013a). La reconstitution du climat porte à croire à une grande corrélation entre la température de surface et la concentration en dioxyde de carbone. De plus, des échantillons prélevés au cœur des glaces révèlent que la concentration actuelle de dioxyde de carbone dans l'atmosphère est supérieure à ce qu'elle a jamais été depuis 800 000 ans (Lüthi *et al.*, 2008).

Les gaz à effet de serre accroissent la quantité d'énergie retenue dans l'atmosphère en captant le rayonnement thermique émis par la surface et l'atmosphère terrestres. Selon les récentes estimations, l'atmosphère retient bien plus d'énergie solaire qu'elle le faisait avant l'ère industrielle, principalement à cause de l'augmentation de la concentration de dioxyde de carbone (GIEC, 2013b). D'autres causes possibles des changements climatiques sont les aérosols (petites particules qui réfléchissent le rayonnement dans la haute atmosphère, comme le soufre, l'oxyde nitreux, le charbon noir et le carbone organique) et la variation de l'intensité du rayonnement émis par le soleil selon les cycles solaires. Cependant, les aérosols introduits par l'activité humaine ont généralement un effet de refroidissement sur le climat. En outre, les mesures directes par satellite n'indiquent pas de tendance historique de rayonnement solaire susceptible d'être reliée aux augmentations actuelles de la température planétaire (Myhre *et al.*, 2013).

De récentes études ont révélé une corrélation entre les émissions cumulatives de dioxyde de carbone et les variations de la température moyenne mondiale, l'accumulation des émissions avec le temps étant étroitement associée à un niveau attendu de réchauffement (GIEC, 2013b; Friedlingstein, 2014). Ces constatations ont une incidence sur l'élaboration des politiques climatiques et l'établissement des cibles de réduction des émissions. Par exemple, le seuil actuel convenu au-delà duquel les changements climatiques sont dangereux et la base sur laquelle s'effectuent les négociations internationales en cours correspondent aux émissions cumulatives liées à un réchauffement climatique maximum de 2 °C. Or, la recherche porte à croire que les deux tiers de ces émissions ont déjà été libérés et que le restant le sera dans les 15 à 30 prochaines années (Friedlingstein, 2014). La modélisation récente laisse penser que si les émissions continuent à évoluer à la cadence actuelle et qu'aucune mesure d'atténuation n'est prise, le climat de la Terre se réchauffera probablement de 3,7 à 4,8 °C d'ici à 2100 (GIEC, 2014e). Autre conséquence de la relation entre

les émissions cumulatives et la hausse de la température, limiter l'augmentation des températures à 2 °C exigerait de ne pas exploiter une vaste partie des réserves de combustibles fossiles avérées. McGlade et Ekins (2015) estiment qu'un tiers des réserves de pétrole connues (dont près de trois quarts des réserves avérées du Canada, qui sont principalement du bitume), la moitié des réserves de gaz naturel connues et plus de 80 % des réserves de charbon connues devraient être conservées dans le sol pour que la température ne dépasse pas 2 °C.

L'usage de combustibles fossiles n'est pas la seule source d'émissions de gaz à effet de serre. Celles-ci proviennent également des modifications à l'affectation des terres et de la déforestation (qui peuvent libérer du dioxyde de carbone stocké dans les sols et les forêts), des procédés agricoles (qui peuvent provoquer la libération de méthane), de la décomposition des déchets, de la production de ciment (qui libère du dioxyde de carbone lors de la transformation chimique nécessaire à la production de chaux à partir de pierre calcaire et de l'emploi de combustibles fossiles) et d'autres procédés industriels qui rejettent des gaz à effet de serre, tels que le méthane, l'oxyde nitreux et les gaz fluorés (utilisés dans la production de l'aluminium et dans la fabrication des semi-conducteurs). Ces émissions ne sont pas négligeables. Les émissions *nettes* de gaz à effet de serre estimées (c.-à-d. y compris les émissions et l'absorption de sources terrestres) des changements d'affectation des terres et de la foresterie au Canada varient d'une année à l'autre et sont parfois négatives (quand les puits de carbone terrestres absorbent plus de dioxyde de carbone qu'il en est libéré); cependant, elles représentent une partie notable des émissions totales du Canada. Avec plus de 3 millions de kilomètres carrés de forêts, le pays possède la troisième superficie forestière en importance au monde, après la Russie et le Brésil (Banque mondiale, 2015). Des quantités considérables de dioxyde de carbone sont stockées dans ces forêts, qui l'absorbent ou le relâchent selon les conditions environnementales et les méthodes de gestion. Les agents stressés associés au climat, comme les feux, les invasions d'insectes, les maladies et les sécheresses, peuvent menacer la santé de cette forêt et mener à des rejets supplémentaires de dioxyde de carbone. Cependant, comme l'indique la figure 1.3, les émissions mondiales provenant de la production d'énergie représentent plus de 70 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GIEC, 2014e; Le Quéré *et al.*, 2014), et ce pourcentage ne cesse d'augmenter (Le Quéré *et al.*, 2014). Par ailleurs, la proportion des émissions provoquées par les changements d'affectation des terres et la déforestation a baissé au cours de la dernière décennie. Au Canada, les émissions causées par la production énergétique représentaient 74 % des émissions totales de gaz à effet de serre en 2012, émissions dues aux changements d'affectation des terres et de la foresterie comprises (Environnement Canada, 2015c).



Source des données : WRI, 2014

Figure 1.3

### Proportion des émissions mondiales de gaz à effet de serre par source, 2012

La figure présente la répartition des émissions mondiales de gaz à effet de serre par source. La valeur pour *Changement de l'affectation des terres et foresterie* correspond aux émissions nettes après la prise en compte des puits et sources de carbone terrestres. *Combustibles de soute* correspond aux émissions du transport aérien et maritime international, qui utilisent aussi des combustibles fossiles.

### 1.3.3 Les incidences et les risques des changements climatiques

Les changements climatiques devraient avoir une vaste gamme d'incidences sur les systèmes naturels et sociaux. Ces incidences peuvent être positives ou négatives pour la société. L'augmentation des températures, par exemple, peut avoir des effets positifs sur les systèmes agricoles dans certaines régions, et apporter des avantages économiques (Porter *et al.*, 2014). Dans les régions de hautes latitudes (Canada compris), les températures plus chaudes peuvent atténuer certains problèmes de santé associés aux climats froids (Martin *et al.*, 2012). Cependant, les études portent généralement à croire que dans la plupart des endroits, les répercussions négatives sur la santé de l'augmentation de la fréquence des chaleurs extrêmes dépasseront les avantages procurés par la réduction du nombre de journées froides (Smith *et al.*, 2014a). Les risques des changements climatiques ne sont pas uniformément répartis sur la planète. Il se peut que des pays soient touchés plus négativement ou plus positivement que d'autres. Néanmoins, selon la majeure partie des données probantes, l'ampleur et le rythme prévus des changements climatiques constituent une menace importante et étendue pour les collectivités humaines et les écosystèmes terrestres.

La hausse des températures et la variation des conditions climatiques créent un ensemble de risques pour la société, dont certains se sont déjà concrétisés si on se fie aux tendances récentes. À certains endroits, les températures peuvent augmenter à des niveaux menaçant les cultures, les élevages d'animaux et les travailleurs extérieurs. La fréquence et la durée des vagues de chaleur augmenteront probablement aussi dans le futur, ce qui aura des effets négatifs sur les villes, et les épisodes de précipitations extrêmes gagneront probablement en intensité et en fréquence dans de nombreux pays (GIEC, 2014d). Les systèmes agricoles sont touchés par les régimes de températures et de précipitation. Il est prouvé que les changements climatiques ont déjà nui à la production mondiale de blé et de maïs à cause de la sensibilité de ces cultures aux extrêmes climatiques, et des hausses des températures mondiales de 4 °C et plus poseront probablement de gros risques à la sécurité alimentaire planétaire (Porter *et al.*, 2014).

Les espèces et les écosystèmes marins seront de plus en plus menacés par l'acidification des océans, et les collectivités côtières sont en danger à cause des effets combinés de la hausse du niveau de la mer et des possibles ondes de tempête (Pörtner *et al.*, 2014). Les récifs coralliens sont particulièrement vulnérables (Pörtner *et al.*, 2014), tout comme les collectivités qui dépendent de leur écosystème pour le tourisme ou la pêche. On pense qu'une vaste proportion des espèces terrestres et d'eau douce sont de plus en plus menacées d'extinction en raison des changements climatiques (GIEC, 2014c), en partie à cause des interactions entre ces changements et d'autres agents stressants, comme la perte et la dégradation des habitats. La plupart des espèces végétales ne peuvent pas changer naturellement d'aire de répartition géographique assez rapidement pour suivre le rythme du réchauffement prévu par les modèles actuels (Settele *et al.*, 2014). Les données probantes tirées de l'étude des fossiles portent à croire que les précédents épisodes de changements climatiques, qui se sont déroulés bien plus graduellement que l'épisode actuel, ont provoqué d'importantes vagues d'extinction (Settele *et al.*, 2014).

Les extrêmes climatiques, comme les vagues de chaleur, les sécheresses, les inondations, les cyclones et les feux de forêt, peuvent poser de grands risques aux collectivités vulnérables. Selon les projections, les changements climatiques devraient accroître les déplacements de population sur toute la planète, déclencher des conflits pour les ressources et exacerber les problèmes tels que la pauvreté et la dégradation de l'environnement (Adger *et al.*, 2014). Ils pourraient aussi porter atteinte à la santé humaine, bien que ce risque ne soit pas bien quantifié (Smith *et al.*, 2014a). Les incidences sur la santé des changements climatiques peuvent se matérialiser de manière directe, comme

dans le cas de la hausse de la morbidité et de la mortalité due à la chaleur (p. ex. augmentation de l'incidence des troubles provoqués par les vagues de chaleur), et par la transformation des vecteurs de maladies telles que la malaria, la dengue et les infections transmises par les tiques, comme la maladie de Lyme (GIEC, 2014a; Smith *et al.*, 2014a).

L'Amérique du Nord en général et le Canada en particulier sont exposés à de nombreux risques dus aux changements climatiques (RNCAN, 2014f; Romero-Lankao *et al.*, 2014). Parmi les secteurs de l'économie canadienne susceptibles d'être touchés par les chocs climatiques ou météorologiques, on peut citer les ressources naturelles traditionnelles, comme l'agriculture, la foresterie, la pêche et la production hydroélectrique (RNCAN, 2014f). L'industrie touristique risque elle aussi de souffrir de l'évolution des conditions climatiques et météorologiques (Arent *et al.*, 2014). Le réchauffement du climat pourrait permettre l'intensification de l'activité économique dans le Grand Nord canadien; toutefois, la fonte des routes de glace et du pergélisol et les conditions de glace moins prévisibles pourraient également menacer l'infrastructure et les affaires dans cette région. Les risques causés par les fortes précipitations, les inondations et autres épisodes météorologiques extrêmes pourraient s'accroître, non seulement à cause de la modification du climat, mais aussi parce que l'exposition à ces risques augmente avec la croissance démographique et le développement dans les régions dangereuses. La hausse de la valeur des propriétés et du développement de l'infrastructure peut aussi accroître l'exposition aux risques et conduire à de plus grandes pertes économiques. Les pertes économiques provoquées par les épisodes météorologiques extrêmes ont d'ailleurs augmenté au Canada ces 10 dernières années. En 2013 seulement, les inondations à Calgary et Toronto et dans la région ont entraîné plus de 2,5 milliards de dollars de demandes d'indemnisation (RNCAN, 2014f)<sup>1</sup>.

Nombre des risques résultants des changements climatiques ne peuvent pas encore être quantifiés, et les modèles climatiques n'offrent actuellement qu'une indication grossière de la probabilité et de l'échelle potentielle des répercussions. Les estimations des dommages économiques conséquences des futurs changements climatiques sont aussi hautement incertaines (Arent *et al.*, 2014). La possibilité que les changements climatiques aient des conséquences catastrophiques pour l'humanité à long terme remet aussi en question l'utilité des méthodes d'analyse coûts-bénéfices conventionnelles (Weitzman, 2009, 2011; Wagner et Weitzman, 2015). Quand les économistes ont pesé les coûts et les avantages de la prise de mesures pour atténuer les émissions, ils en ont conclu dans presque tous les cas qu'il

---

1 Tous les montants sont en dollars canadiens, sauf indication contraire.

est justifié de réduire de manière importante les émissions en raison des risques et des dommages possibles des changements climatiques, que plus les atténuations sont retardées plus leurs coûts sont élevés et que les risques climatiques et les dommages augmentent proportionnellement au cumul des émissions et de la hausse prévue des températures mondiales (Nordhaus et Boyer, 2000; Stern, 2006; Nordhaus, 2008, 2013; Tol, 2009, 2014; Hope, 2011). Selon le comité d'experts, pour le Canada et la planète en général, les risques découlant des changements climatiques soutiennent le déploiement d'efforts importants et accélérés pour réduire les émissions produites par l'activité humaine durant ce siècle.

#### 1.4 LE CANADA DANS LE CONTEXTE MONDIAL

Les changements climatiques sont un problème commun à l'ensemble de la planète. Les gaz à effet de serre se mélangent librement dans l'atmosphère et les émissions d'un pays ont des répercussions sur l'entièreté du système climatique mondial. Les changements climatiques témoignent également de la *tragédie des biens communs*<sup>2</sup> et des difficultés inhérentes à la gestion d'une ressource commune — dans ce cas, l'atmosphère terrestre. Confrontés à l'objectif partagé d'empêcher les changements climatiques de devenir nuisibles, les pays ont avantage à profiter gratuitement des réductions des émissions réalisées ailleurs et à ne pas mettre eux-mêmes en place des mesures de réduction (Nordhaus, 2015). Cependant, réduire suffisamment les émissions pour que les changements climatiques ne soient pas dommageables requerra l'action de tous les principaux émetteurs, pays développés comme pays en développement. Inciter aux baisses nécessaires exigera probablement des efforts coordonnés afin que les pays attribuent de façon efficace les responsabilités pour les réductions requises au sein d'un cadre transparent et applicable.

Des efforts sont en cours depuis plus de 20 ans pour mettre sur pied un accord international contraignant sur les changements climatiques. Participant actif à cet effort, le Canada a signé le Protocole de Kyoto et l'Accord de Copenhague. Les pays négocient maintenant l'élaboration d'un accord qui succédera au Protocole de Kyoto, sous l'égide de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC). Dans l'Accord de Copenhague conclu en 2009, la communauté internationale s'est collectivement engagée à prendre des mesures pour limiter la hausse des températures à 2 °C. Malgré cela, les émissions mondiales ont continué à augmenter et à chaque année qui passe, il devient plus difficile et coûteux de réaliser cet objectif. À la suite

---

2 Une *tragédie des biens communs* se produit quand une ressource commune, comme un pâturage, est surexploitée par des personnes agissant pour leur propre intérêt (Hardin, 1968).

de l'Accord de Copenhague, le Canada s'est fixé comme cible de réduire de 17 % ses émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2020 par rapport au niveau de référence de 2005. En 2015, dans le cadre des négociations internationales continues, le Canada a aussi annoncé son engagement à réduire ses émissions de 30 % d'ici à 2030, toujours par rapport au niveau de 2005 (sa *contribution prévue déterminée au niveau national*). Des ententes bilatérales peuvent aussi jeter les bases d'une future coopération internationale sur les changements climatiques; les États-Unis et la Chine, les deux plus gros émetteurs au monde, ont d'ailleurs annoncé un accord conjoint sur les changements climatiques le 11 novembre 2014.

Le Canada contribue de façon importante aux émissions mondiales. En 2013, il se classait au 12<sup>e</sup> rang sur 219 en matière d'émissions totales de dioxyde de carbone et représentait 1,4 % du total mondial (Boden *et al.*, 2013). Parmi les pays de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), seuls les États-Unis, la Russie, le Japon, l'Allemagne et la Corée du Sud produisaient plus d'émissions, et seulement trois (Australie, Luxembourg et États-Unis) affichaient un taux d'émissions par habitant supérieur (Banque mondiale, 2015). Les émissions de gaz à effet de serre canadiennes ont baissé dans le sillage de la crise financière mondiale et la croissance des émissions a ralenti à cause des nouvelles politiques provinciales, comme la taxe sur le carbone de Colombie-Britannique, et de la fermeture des centrales au charbon en Ontario (CEDD-BVG, 2014). Cependant, la croissance des émissions a repris, et le Canada n'atteindra probablement pas son objectif de réduction pour 2020 (Environnement Canada, 2013c; CEDD-BVG, 2014). Il s'agit d'une tendance qui dure depuis longtemps : le Canada a fixé quatre fois des cibles de réduction des émissions nationales depuis 1988, sans jamais mettre en œuvre des politiques permettant de réaliser ces objectifs.

Comme il est noté à la section 1.3.2, le Canada pourrait aussi devenir une source majeure d'émissions à cause du dioxyde de carbone stocké dans ses réserves de combustibles fossiles. Le pays possède les troisièmes réserves avérées de pétrole au monde, après l'Arabie saoudite et le Venezuela (EIA, 2014a), il est le quatrième producteur mondial de gaz naturel (RNCAN, 2014b) et il constitue un important exportateur de charbon (RNCAN, 2014b). L'Office national de l'énergie (ONÉ) prévoit également que, si la tendance se maintient, les combustibles fossiles combleront les trois quarts des besoins en énergie du Canada en 2035, le restant étant assuré par l'hydroélectricité et le nucléaire (ONÉ, 2013). Si rien ne change, le Canada continuera probablement à être un grand exportateur de combustibles fossiles, avec une production pétrolière qui

pourrait passer d'environ 4 millions de barils par jour en 2015 à 5 ou 6 millions entre 2020 et 2030 (CAPP, 2014; AIE, 2015a). En raison du potentiel d'émission de ces sources, le développement de l'industrie canadienne des combustibles fossiles aura une influence majeure sur la tendance en matière de rejet, à l'intérieur comme à l'extérieur du Canada. Ce sujet continue à être au cœur des débats et des analyses sur la possibilité d'exploiter durablement les énormes ressources canadiennes de combustibles fossiles, particulièrement devant l'importance de l'industrie pétrolière et gazière pour l'économie canadienne (p. ex. ACG, 2012a, 2014). Étant donné que les sables bitumineux ont été la principale cause de la croissance des émissions au Canada durant la dernière décennie (Environnement Canada, 2013b, 2015c), leur gestion est cruciale pour la stabilisation, voire la réduction, des émissions nationales.

Comme de nombreux pays, le Canada peut contribuer à l'atténuation des changements climatiques mondiaux de nombreuses façons. Les gouvernements peuvent y soutenir l'élaboration de nouveaux accords internationaux sur le climat, participer à des efforts régionaux de réduction des émissions en Amérique du Nord, appuyer le développement de technologies énergétiques à faibles émissions et prendre des mesures pour réduire les émissions nationales produites par l'emploi, notamment, de combustibles fossiles. Ils peuvent aussi mettre en place des mesures commerciales pour donner plus de chances aux entreprises qui font face à la concurrence d'États<sup>3</sup> dont les politiques climatiques sont moins strictes. En dehors du gouvernement, les entreprises et les consommateurs peuvent aussi accomplir des gestes qui contribuent à la réduction des émissions en économisant l'énergie, en adoptant des technologies plus efficaces et en utilisant de l'énergie issue de sources produisant moins d'émissions.

En fin de compte, la réalisation d'importantes réductions des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle planétaire nécessitera que la plupart des pays — Canada compris — fassent la transition vers un système énergétique à faibles émissions. Il s'agit d'un immense défi, compte tenu de la dépendance généralisée aux sources et technologies énergétiques à fortes émissions dans la majeure partie du monde. Les probabilités pour que le Canada réussisse cette transition sont donc, à de nombreux égards, le reflet de celles des autres économies. Si la présente évaluation se concentre sur le Canada, la majeure partie de l'examen et de l'analyse est applicable à d'autres pays.

---

3 Sauf lorsqu'il est évident que l'on parle exclusivement des États-Unis, dans le présent rapport, le terme « État » regroupe également les notions de pays, de province et de territoire [N.D.T.].

## 1.5 APPERÇU DU RAPPORT

Les publications sur l'utilisation de l'énergie et sur les changements climatiques s'étendent de documents éducatifs brefs et largement accessibles à de vastes rapports de synthèse pluriannuels rédigés par plusieurs auteurs. Le comité d'experts s'est efforcé de produire une synthèse crédible et concise des connaissances concernant les technologies et les politiques susceptibles d'appuyer la transition vers une économie à faibles émissions. Tout au long de son rapport, il fournit des références au lecteur désirant en savoir plus sur certains sujets. Par ailleurs, si les outils technologiques et politiques disponibles pour limiter les émissions issues des systèmes énergétiques sont applicables à l'échelle mondiale, le présent rapport s'appuie sur les aspects et les facteurs les plus pertinents pour le contexte canadien. Il vise à servir d'outil d'information aux décideurs du secteur privé qui cherchent continuellement à anticiper les futurs progrès susceptibles de toucher le processus décisionnel de leur entreprise. Il est aussi pertinent pour les ministères et les organismes ministériels à l'échelle fédérale, provinciale, territoriale et municipale, qui étudient des solutions pour motiver de nouvelles réductions des émissions, que pour la population dans son ensemble quand elle évalue les difficultés posées par les changements climatiques et les possibles stratégies permettant d'y faire face. Le comité d'experts espère que ce rapport contribuera au dialogue continu au Canada et à l'étranger, dans de nombreux secteurs, sur les stratégies nécessaires pour passer à un système énergétique à faibles émissions.

Le reste du rapport est structuré de la façon suivante :

Le **chapitre 2** présente les systèmes énergétiques en général et dresse un aperçu du système canadien en particulier. Il met en lumière des faits concernant la façon dont l'énergie est produite, distribuée et utilisée pour offrir une gamme de services de base. Il passe également en revue la demande et l'offre énergétiques au Canada, les tendances en matière d'émissions de gaz à effet de serre issues de la production d'énergie et les données probantes sur les transitions de système énergétique.

Le **chapitre 3** examine les sources et technologies énergétiques dans quatre secteurs touchés par le passage à un système énergétique à faibles émissions : la production d'électricité, le transport, le bâtiment et l'industrie. Il cerne les mesures d'amélioration de l'efficacité et les possibilités de captage et de stockage du carbone et de substitution interénergétique, et étudie les obstacles systémiques à l'adoption plus large de technologies énergétiques à faibles émissions de rechange.

Le **chapitre 4** se penche sur les outils politiques disponibles pour appuyer le passage aux sources et technologies énergétiques à faibles émissions. Il offre également une analyse de différentes politiques selon des critères clés et résume les leçons tirées de l'élaboration et de la mise en application de ces politiques au Canada et dans d'autres pays ou régions.

Le **chapitre 5** conclut le rapport en présentant les réflexions du comité d'experts sur les perspectives de passer à un système énergétique à faibles émissions au Canada et sur les éléments cruciaux qui encourageront et faciliteront un tel passage dans les années à venir.

# 2

## Comprendre le système énergétique canadien

- Qu'est-ce qu'un système énergétique
- Le système énergétique canadien
- Émissions de gaz à effet de serre d'origine énergétique du Canada
- Transitions de système énergétique
- Résumé

## 2 Comprendre le système énergétique canadien

### Principales constatations

- Un système énergétique comprend les ressources, les technologies, les processus et les procédés participant à la conversion de l'énergie en services utiles, comme l'éclairage, le transport, le chauffage et la climatisation et la transformation des matériaux.
- De considérables quantités d'énergie sont perdues lors de la conversion dans tout le système énergétique. Ces pertes offrent des possibilités d'améliorer l'efficacité, parfois par l'intégration de procédés et de technologies.
- Le Canada affiche une forte consommation d'énergie par habitant en raison du niveau de vie élevé, de son énorme richesse en ressources énergétiques et des prix relativement faibles de l'énergie, de sa vaste masse terrestre, de son climat variable et de sa structure industrielle. La demande en énergie devrait continuer à y croître dans les prochaines décennies, particulièrement dans l'industrie.
- Le Canada compte sur les combustibles fossiles pour satisfaire la majeure partie de ses besoins énergétiques et la dépendance à ces sources d'énergie continuera si aucun changement technologico-politique majeur n'intervient. La production et la conversion des combustibles fossiles à des fins d'exportation nuisent aussi à la capacité du Canada à réduire ses émissions.
- Les transitions de système énergétique prennent généralement des décennies, à cause de la longévité de l'infrastructure et des investissements massifs requis. Cependant, elles peuvent être accélérées grâce à des politiques drastiques. Minimiser les coûts des transitions énergétiques nécessite de profiter du taux de renouvellement naturel des différentes immobilisations.

Comme la plupart des pays, le Canada compte sur les combustibles fossiles pour satisfaire la majeure partie de ses besoins énergétiques. Par conséquent, une grande partie des modes d'utilisation quotidienne de l'énergie, notamment la conduite automobile, le chauffage des maisons et des bâtiments et la cuisine, produit des émissions de gaz à effet de serre. Abandonner le modèle de dépendance continue à un système énergétique à fortes émissions demande de modifier de nombreux volets de la production, de la distribution et de l'emploi de l'énergie. Dans le contexte canadien, cela exige également de tenir compte des caractéristiques distinctives du système énergétique national et de modifier la demande énergétique et les émissions.

Ce chapitre présente les systèmes énergétiques et dresse le portrait de l'énergie et des émissions au Canada. La première section souligne des faits et des concepts fondamentaux qu'il faut connaître pour comprendre les systèmes énergétiques, comme la distinction entre les sources d'énergie primaires et secondaires. La deuxième section définit les caractéristiques clés du système énergétique canadien; elle présente notamment des renseignements de base sur l'offre et la demande en énergie et les tendances récentes concernant la croissance des émissions. La dernière section résume les données probantes sur les transitions de système énergétique et ce qu'elles signifient pour les gouvernements qui espèrent faciliter le passage à un système énergétique à faibles émissions.

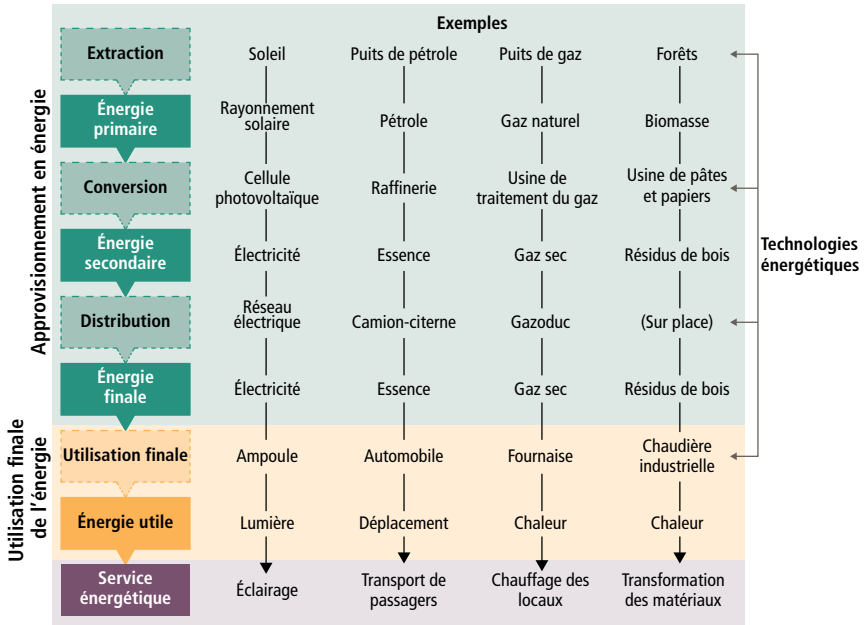
## 2.1 QU'EST-CE QU'UN SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE?

Un *système énergétique* comprend les ressources, les processus, les technologies et les procédés participant à la production, à la conversion, à la distribution et à l'usage de l'énergie. Il relie les systèmes naturels et sociaux et possède des composantes géologiques, biologiques, économiques et technologiques. La figure 2.1 présente le schéma d'un système énergétique et illustre la façon dont l'énergie est produite et transformée au moyen d'une série de procédés à mesure qu'elle passe de sa source à son utilisation finale. La demande en énergie est en définitive guidée par le besoin de *services* énergétiques élémentaires, comme l'éclairage, le transport, le chauffage, la climatisation et la transformation des matériaux. Ces services sont fournis par des *dispositifs* tels que des ampoules, des automobiles, des fournaies ou des chaudières industrielles, qui convertissent l'énergie en une forme utile comme la lumière, le mouvement (énergie cinétique) ou la chaleur.

### 2.1.1 Sources primaires et secondaires d'énergie

Les sources fondamentales d'énergie du système sont appelées *sources primaires*. Elles fournissent l'énergie contenue dans les ressources à leur état naturel, comme l'énergie chimique renfermée dans les combustibles fossiles et la biomasse, le rayonnement solaire, l'énergie cinétique inhérente au mouvement du vent ou de l'eau ou l'énergie que recèlent les liaisons des noyaux atomiques (Grubler *et al.*, 2012c). Les sources primaires d'énergie existent parfois sous forme de stocks, qui sont extraits par les entreprises d'exploitation des ressources naturelles (par exemple, au moyen de puits de pétrole ou de mines d'uranium). Dans d'autres cas, l'énergie est captée à partir de *flux* naturels, comme le rayonnement solaire ou l'eau s'écoulant dans un bassin versant. Par définition, les stocks sont épuisables, alors que les flux d'énergie se renouvellent constamment. En ce qui concerne les stocks de combustibles fossiles, la taille de la ressource est évaluée grâce à l'étude du volume total pouvant être extrait à l'aide des technologies et dans les conditions économiques actuelles — c'est ce qu'on

appelle les *réserves avérées*. Les sources primaires d'énergie employées dans la plupart des systèmes énergétiques modernes sont les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel), l'énergie nucléaire et les flux renouvelables d'origine hydraulique, solaire, éolienne, géothermique et marémotrice et tirés de la biomasse (comme le bois) (Grubler *et al.*, 2012c).



Adapté avec la permission de l'International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA); voir Grubler *et al.*, 2012c

Figure 2.1

### Le système énergétique : sources, étapes et conversions

La figure représente schématiquement le système énergétique. Elle illustre la façon dont l'énergie circule des sources primaires à son utilisation finale et à la fourniture de services d'énergie, en passant par de multiples étapes et conversions. Noter que les ressources énergétiques transitent souvent par des réseaux de transport et de distribution distincts et que les réseaux de transport se trouvent souvent avant la conversion (p. ex. pipelines).

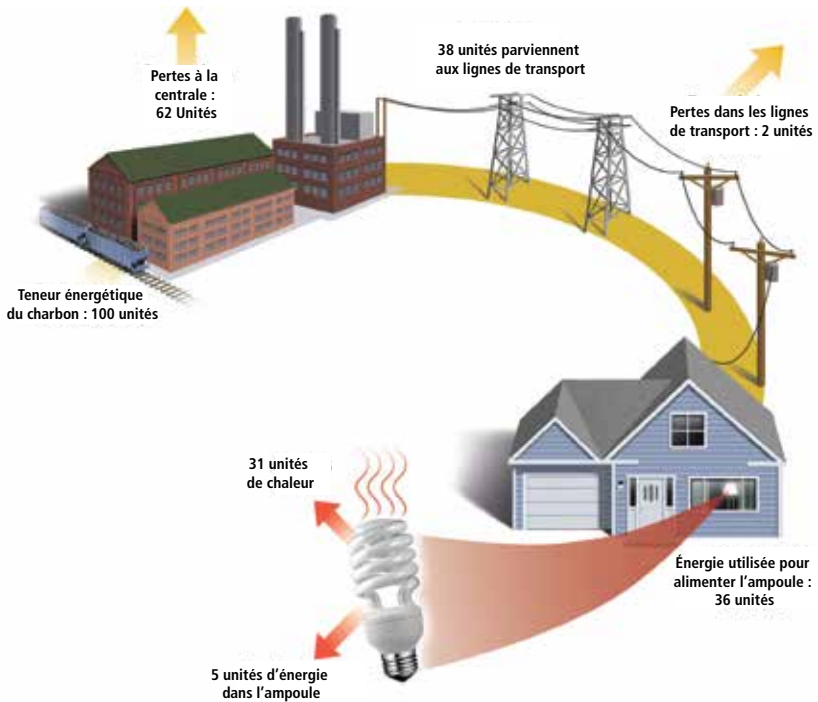
Cependant, ces sources primaires sont rarement utilisées sous leur forme originale. Le plus souvent, elles sont transformées en une forme plus pratique et utilisable, ce qu'on appelle les *sources secondaires* d'énergie ou vecteurs d'énergie. Par exemple, le pétrole brut (source primaire) est raffiné pour produire des carburants pétroliers, comme l'essence (source secondaire), et le rayonnement solaire est transformé en électricité par une cellule photovoltaïque.

L'énergie secondaire sert à distribuer l'énergie primaire aux endroits où elle sera finalement utilisée. Les produits pétroliers raffinés (comme l'essence, le diesel et le carburant aviation) constituent la source principale d'énergie dans le transport. L'électricité est un vecteur d'énergie polyvalent produit par de nombreux dispositifs de conversion (comme les turbines éoliennes, les centrales hydroélectriques et les centrales au charbon). Elle est employée dans une large gamme d'applications, des ordinateurs aux électroménagers, en passant par l'éclairage des rues et l'équipement industriel. Les sources secondaires d'énergie sont transportées dans l'ensemble du système énergétique et distribuées aux utilisateurs finaux au moyen de divers nœuds, dont les réseaux électriques, les pipelines, les camions, les navires-citernes et les trains. Toutes les sources primaires ne doivent pas passer par une intense transformation avant leur usage définitif. Par exemple, la biomasse ou l'énergie solaire peuvent parfois être consommées directement, comme dans le cas des biocarburants traditionnels utilisés pour la cuisine ou du soleil employé pour le chauffage passif des maisons.

### 2.1.2 Conversion d'énergie et pertes

Comme l'énergie est convertie d'une forme en une autre et distribuée dans tout le système, une grande partie se perd, généralement sous forme de chaleur résiduelle. L'énergie utile obtenue à la fin de la conversion ne représente donc souvent qu'une faible proportion de l'énergie renfermée dans la source primaire. Par exemple, comme le montre la figure 2.2, quand de l'électricité produite par une centrale au charbon est utilisée pour alimenter une ampoule fluocompacte type, seulement 5 % de cette énergie se retrouve sous forme de lumière utile. À peine environ un tiers de l'approvisionnement mondial en énergie primaire est converti en services utiles avec les technologies et les procédés de conversion actuels (Grubler *et al.*, 2012c).

Les pertes dues à chacune des étapes de la conversion nuisent collectivement à l'efficacité globale du système énergétique et dépendent de la technologie et du procédé concerné. La conversion offre une occasion de réaliser des gains d'efficacité; par conséquent, elle représente une ressource énergétique exploitable. L'efficacité peut être accrue directement par l'amélioration de la conversion (p. ex. au moyen de cellules solaires plus efficaces), de la distribution (p. ex. grâce à des transformateurs à haute efficacité) et des dispositifs destinés aux usagers (p. ex. par des électroménagers écoénergétiques). Les pertes d'énergie lors de l'emploi de combustibles pour produire de l'électricité et durant le transport sont particulièrement élevées, alors que les pertes dans la transmission et la distribution de l'électricité sont, en comparaison, faibles.



Adapté avec la permission de la National Academy of Sciences; voir NRC, 2008

Figure 2.2

### Efficacité du système énergétique pour l'éclairage à partir d'une centrale au charbon

La majeure partie de l'énergie contenue dans les sources primaires est perdue durant la conversion aux diverses étapes du système énergétique. La figure illustre les pertes dans la chaîne et dans le système énergétique lorsqu'on alimente une ampoule fluocompacte type avec de l'électricité produite par une centrale au charbon. Seulement 5 % de l'énergie renfermée dans le charbon est transformée en énergie utile sous forme de lumière.

Passer à des sources d'énergie de substitution associées à des technologies et des canaux de conversion plus efficaces peut aussi entraîner des gains d'efficacité, tout comme améliorer l'intégration des systèmes énergétiques, à la condition de pouvoir capter la chaleur résiduelle et la recycler en énergie utile. Un exemple de ce principe est la cogénération, dans laquelle la chaleur produite par une centrale électrique est utilisée à des fins résidentielles et industrielles (voir les sections 3.3.1 et 3.4.1). Les possibilités d'améliorer l'efficacité énergétique sont vastes; cependant, les gains sont parfois limités par des obstacles technologiques, économiques et comportementaux. Par exemple, des contraintes thermodynamiques fondamentales font en sorte qu'une partie de l'énergie est inévitablement perdue dans tout procédé de

conversion. Les gains d'efficacité énergétique peuvent également produire un effet de rebond qui fait que la consommation d'énergie augmente à mesure que les consommateurs achètent plus d'un service moins coûteux et disposent d'une part plus importante de leurs revenus pour acheter d'autres produits et services consommant de l'énergie<sup>4</sup>.

## 2.2 LE SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE CANADIEN

Les modèles de production et de consommation d'énergie sont influencés par la géographie naturelle et bâtie de chaque pays ainsi que par d'autres facteurs, comme les prix de l'énergie, les niveaux de revenu et la structure industrielle. La variabilité du climat, la richesse en ressources naturelles et les caractéristiques géographiques et écologiques influent sur les flux d'énergies renouvelables et peuvent avoir un effet sur la demande en énergie pour le chauffage et la climatisation. Les caractéristiques de l'infrastructure existantes, telles que les réseaux électriques, les pipelines ou les réseaux de transport, et les villes, peuvent aussi influencer la demande en énergie et différencier les pays et les régions. Le système énergétique canadien reflète une abondance en ressources énergétiques et le statut du pays comme gros exportateurs d'énergie. La figure 2.3 illustre ce système; elle représente les flux d'énergie entre la production (et l'importation) et la conversion, et jusqu'à sa transformation en énergie et en services utiles. La production d'énergie est représentée à gauche et l'utilisation finale, à droite. La ligne située en haut, par exemple, montre l'énergie produite au Canada à partir de l'uranium. La majeure partie de cet uranium est exporté et seulement environ 15 % de la production sont dirigés vers les réacteurs nucléaires canadiens et utilisés pour produire de l'électricité (RNCan, 2014d). Cette électricité est ensuite distribuée aux utilisateurs dans tous les secteurs et exportée vers les États-Unis. Les pertes de conversion, qui dépassent largement la quantité d'énergie utile captée dans le système,

---

4 L'ampleur de l'effet de rebond fait l'objet d'un intense débat. Selon l'InterAcademy Council (2007), « les études théoriques et empiriques ont démontré qu'en général, seule une faible portion des économies d'énergie est perdue en augmentation de la consommation » [traduction libre]. Cependant, d'autres organismes ont exploré la théorie voulant que les gains d'efficacité puissent avoir un effet complètement contraire et résulter, en fin de compte, à l'augmentation globale de la production et de la consommation (c'est le *paradoxe de Jevons*; à ce sujet, voir Alcott (2005) et Sorrell (2007)).

sont également reproduites en bas à droite. Les données utilisées pour cette figure sont calculées en pétajoules (PJ), bien que d'autres unités soient aussi souvent employées dans la mesure des flux d'énergie<sup>5</sup>.

### 2.2.1 Ressources et production énergétiques

Le paysage énergétique du Canada se caractérise par une énorme richesse en ressources énergétiques, notamment en combustibles fossiles et en sources d'énergie à faibles émissions. Le Canada est un des cinq plus importants producteurs mondiaux d'énergie, derrière la Chine, les États-Unis, la Russie et l'Arabie Saoudite (EIA, 2014a). Il est le cinquième producteur mondial de pétrole (avec les troisièmes réserves de pétrole avérées), le quatrième producteur de gaz naturel et le deuxième producteur d'uranium (RNCan, 2014b). Comme l'illustre la figure 2.3, le Canada exporte de gros volumes de ces ressources. Il est aussi le troisième producteur d'hydroélectricité au monde, après la Chine et le Brésil (EIA, 2014a).

Si les ressources énergétiques sont abondantes au Canada, elles ne sont pas uniformément réparties dans le pays. Les réserves de pétrole sont concentrées dans l'ouest, les sables bitumineux représentant aujourd'hui 98 % des réserves avérées. La production pétrolière se déroule aussi dans les champs pétrolifères situés au large du Canada atlantique et dans les champs conventionnels du bassin sédimentaire de l'Ouest canadien. Cette région renferme également la majeure partie des réserves de gaz naturel du Canada, bien que d'autres régions recèlent d'importantes réserves, comme Terre-Neuve et la Nouvelle-Écosse (champs pétrolifères extracôtiers), l'Arctique et la côte pacifique. La révolution du pétrole et du gaz de schiste (voir l'encadré 2.1) a aussi contribué à intensifier l'exploitation du pétrole et du gaz au Canada, ce qui a par la même occasion provoqué une extraordinaire transformation du paysage énergétique nord-américain. La capacité hydroélectrique actuelle du pays est principalement concentrée dans cinq provinces : Colombie-Britannique, Manitoba, Québec, Ontario et Terre-Neuve-et-Labrador. Cependant, toutes les provinces canadiennes, à l'exception de l'Île-du-Prince-Édouard, disposent d'un considérable potentiel hydroélectrique inexploité (ACG, 2012b; PTAE, 2013).

---

5 L'énergie est le plus souvent mesurée en joules, et 1 joule est formellement défini comme le travail d'une force de 1 newton dont le point d'application se déplace de 1 mètre. Cependant, d'autres unités sont souvent utilisées tant pour la mesure que dans les discussions sur l'énergie. La *puissance* est la vitesse à laquelle l'énergie est transférée; elle est mesurée en watts, et 1 watt est égal à 1 joule par seconde. Le kilowattheure (kWh) est utilisé pour mesurer l'électricité (1 kWh est égal à 3,6 mégajoules). En statistiques internationales, on utilise souvent la tonne équivalente pétrole (tep), où 1 tep est égale à 42 gigajoules. Le système impérial emploie l'unité thermique britannique (BTU), et 1 BTU est égale à 1 055 joules. Pour en savoir plus sur les unités et les mesures d'énergie, consulter *Global Energy Assessment* (GEA, 2012).

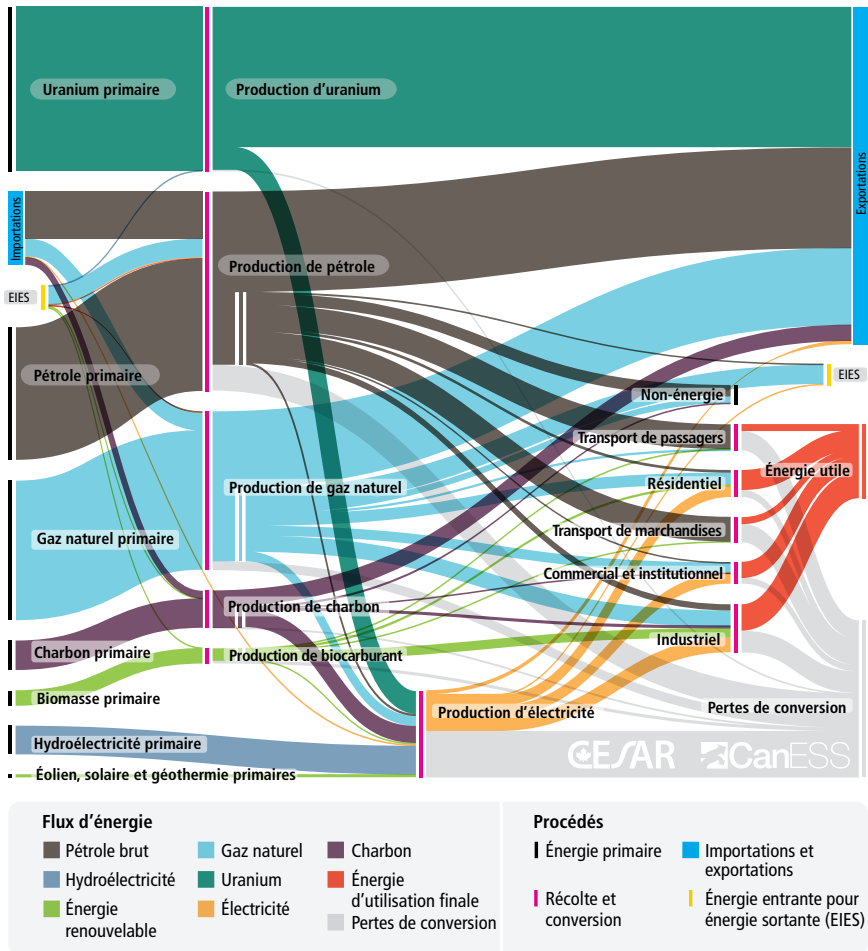


Image créée par CESAR ([www.cesarnet.ca](http://www.cesarnet.ca)) à l'aide de données du modèle CanESS ([www.caness.ca](http://www.caness.ca)).  
Reproduit avec la permission de CESAR, 2015

Figure 2.3

### Flux d'énergie au Canada, 2010

Le système énergétique canadien peut être vu comme le flux d'énergie entre la production (et les importations) et la consommation d'énergie (et les exportations). Les combustibles fossiles prédominent toujours dans ce système, elles sont la principale source de production et de consommation d'énergie. Le statut d'exportateur d'énergie du Canada est évident, tout comme les énormes pertes d'énergie pendant les conversions tout au long du système. L'énergie entrante pour l'énergie sortante (EIES) représente l'énergie consommée pour produire de l'énergie utilisable, comme le gaz naturel brûlé dans la production de pétrole à partir des sables bitumineux de l'Alberta.

### *Encadré 2.1*

#### **La révolution du pétrole et du gaz de schiste en Amérique du Nord**

Les récents progrès technologiques en matière d'extraction du pétrole et du gaz des gisements de schiste ont provoqué une transformation majeure de l'offre énergétique en Amérique du Nord ces dix dernières années. Un ensemble de techniques, comme le forage horizontal de grande portée, la facturation hydraulique en plusieurs étapes et le forage sur socle, ont permis l'exploitation de ressources qui étaient jusqu'ici considérées comme techniquement inexploitable ou non rentables (RNCAN, 2012a). Au Canada, la nouvelle exploitation du gaz de schiste, principalement dans les schistes du bassin de la Horn et de Montney, dans le nord-est de la Colombie-Britannique, a partiellement compensé le déclin de la production à partir des réserves de gaz conventionnelles (RNCAN, 2012a; ONÉ, 2015). Les nouveaux procédés ont aussi conduit à l'exploitation du pétrole de schiste (pétrole des réservoirs étanches) de la formation de Bakken et ailleurs en Saskatchewan, au Manitoba et en Alberta (RNCAN, 2014e). Aux États-Unis, la production de gaz naturel s'est accrue de 35 % entre 2005 et 2013, en grande partie en raison de l'exploitation du gaz de schiste (EIA, 2014b), et la production de pétrole y a augmenté de 44 % durant la même période (EIA, 2015). Conséquence de ce phénomène, l'Amérique du Nord devrait passer du statut d'importateur net d'énergie à celui d'exportateur net en 2015 (BP, 2015). En plus de ses effets sur le commerce de l'énergie mondial et régional, cette évolution a aussi des répercussions sur les émissions de dioxyde de carbone d'origine énergétique. Le surcroît d'abondance de gaz naturel en Amérique du Nord facilite la transition faisant de cette ressource le combustible préférentiel pour la production d'électricité. À la condition qu'il remplace le charbon dans les centrales électriques, il pourrait entraîner des réductions d'émission de dioxyde de carbone. Dans un même temps, le recours accru au gaz naturel sans procédé de CSC risque d'aboutir à d'importants investissements dans une infrastructure énergétique qui provoquera d'importantes émissions durant des décennies.

La capacité d'extraire de l'énergie à partir de ces ressources et de l'acheminer jusqu'au consommateur dépend de l'infrastructure énergétique actuelle. Les complexes énergétiques tels que le cœur industriel de l'Alberta, au nord-est d'Edmonton, et le complexe pétrochimique et de raffinage de Sarnia-Lambton, en Ontario, servent de plate-forme pour le raffinage et la transformation des produits pétroliers et le développement des produits industriels connexes (ACG, 2012b). En 2012, les 19 raffineries canadiennes — dont le nombre est en déclin — avaient la capacité combinée de transformer plus de 2 millions de barils de pétrole par jour (ACG, 2012b). Les réseaux d'oléoducs et de gazoducs

canadiens se déploient sur plus de 700 000 kilomètres et transportent le pétrole brut et le gaz naturel vers les raffineries et les usines de transformation de l'est du Canada et du Midwest des États-Unis (ACG, 2012b). Le Canada dispose également d'un corridor d'uranium, le long duquel le minerai extrait en Saskatchewan est transporté vers Blind River et Port Hope, en Ontario, pour y être transformé. Il possède aussi une grande expertise dans le développement technologique de centrales nucléaires, comme le réacteur Canada Deuterium Uranium (CANDU) (voir l'encadré 2.2). En ce qui concerne l'hydroélectricité, les installations de la baie James, au Québec, fournissent une importante quantité d'électricité destinée à l'exportation aux États-Unis et les installations sur le Columbia, en Colombie-Britannique, constituent un outil majeur de régulation du débit d'eau pour les générateurs d'électricité situés en aval, aux États-Unis.

Les réseaux électriques jouent un rôle crucial dans la distribution d'énergie aux utilisateurs finaux. Au Canada, la gestion de ces systèmes est de compétence provinciale et les ressources énergétiques employées pour produire de l'électricité diffèrent d'une province à l'autre, en fonction de la disponibilité régionale. Les régimes réglementaires régissant les réseaux électriques varient également selon la province. Dans la plupart des cas, les entreprises de services publics d'électricité étaient traditionnellement des sociétés d'État verticalement intégrées agissant comme des monopoles réglementés. Cependant, on assiste à une évolution générale vers la libéralisation partielle du marché, dont l'étendue varie selon la province (AIE, 2009b). Par exemple, l'Ontario et l'Alberta ont entièrement ouvert le marché de l'électricité de détail à la concurrence.

La façon dont sont structurés les marchés de l'électricité peut avoir des répercussions sur la gestion des émissions de gaz à effet de serre produites par ce secteur. L'adoption des concepts de réseaux et de réseaux intelligents pourrait améliorer l'efficacité, la fiabilité et la durabilité des services d'électricité canadiens (Luiken, 2014, 2015).

L'énergie éolienne, l'énergie solaire et la bioénergie ne jouent pas actuellement un grand rôle dans le système énergétique canadien, mais elles pourraient fournir de grosses quantités d'énergie dans l'avenir. Dans de nombreuses régions du Canada, la vitesse moyenne du vent est suffisante pour rendre rentable l'énergie éolienne, les plus puissants régimes éoliens se trouvant dans le nord du Québec, au Labrador, à Terre-Neuve, à l'île du Cap-Breton, à l'Île-du-Prince-Édouard et au large du Canada atlantique (PTAE, 2013). Le potentiel en énergie solaire varie selon les conditions climatiques locales et le rayonnement solaire moyen; cependant, cette source pourrait être exploitée à grande échelle dans le sud du Canada. En raison de l'étendue de leurs forêts et de leurs terres agricoles, combinée à une faible densité de population,

de nombreuses régions du Canada disposent d'un important potentiel de production de bioénergie sous forme de solides (copeaux de bois), de liquides (éthanol, biodiésel) ou de gaz (biométhane)<sup>6</sup>.

### Encadré 2.2

#### Les réacteurs nucléaires CANDU du Canada

Le Canada a acquis une expertise technologique considérable en matière de centrales nucléaires grâce à la conception des réacteurs CANDU. Il s'agit de réacteurs à eau lourde sous pression dont le principe a été conçu par Énergie atomique du Canada limitée à la fin des années 1950 et dans les années 1960. Les réacteurs CANDU possèdent plusieurs caractéristiques qui les distinguent des réacteurs à eau légère classiques. Ils peuvent utiliser de l'uranium naturel, plutôt que de l'uranium enrichi, (ainsi que du thorium) comme combustible et peuvent être ravitaillés pendant qu'ils fonctionnent à pleine puissance — des avantages qui réduisent les coûts de combustible et de ravitaillement par rapport aux autres concepts. Ces économies sont toutefois partiellement compensées par les coûts de production de l'eau lourde utilisée comme modérateur et comme refroidisseur. Les réacteurs CANDU ont évolué pour donner naissance à plusieurs générations de centrales. Les toutes dernières versions produites reposent sur les technologies CANDU 6 évolué (EC6) et le réacteur CANDU avancé (ACR-1000) de génération III est en développement. En 2015, 31 réacteurs CANDU étaient en exploitation dans le monde, au Canada, mais aussi en Corée du Sud, en Roumanie, en Inde, au Pakistan, en Argentine et en Chine.

WNA (2015); ACG (2012b); PTAE (2013)

### 2.2.2 Exportations d'énergie et intégration énergétique en Amérique du Nord

Le statut du Canada comme grand exportateur d'énergie et la forte intégration au système énergétique américain sont d'autres éléments clés du système énergétique canadien. Le Canada est un exportateur net de nombreux produits énergétiques, dont la plupart sont expédiés aux États-Unis. Il est le plus important fournisseur étranger d'énergie de ce pays et ensemble, tous deux forment le plus vaste marché de l'énergie intégré au monde (Ambassade des États-Unis, 2015). Ils bénéficient également de réseaux électriques interconnectés et de marchés d'électricité transfrontaliers, d'un réseau intégré d'oléoducs et de

6 Selon *Global Energy Assessment*, le Canada possède 6,5 % et 2,6 %, respectivement, du potentiel théorique mondial pour 2050 de bioénergie et de biomasse issues des cultures énergétiques, des résidus forestiers, des résidus de culture, des déchets solides municipaux et des déchets animaliers (Rogner *et al.*, 2012).

gazoducs, de la propriété de certains biens et infrastructures énergétiques par le biais d'entreprises, des collaborations et des partenariats transfrontaliers pour le développement de technologies énergétiques et partagent une dépendance à des installations de stockage essentielles (Ambassade des États-Unis, 2015). En raison du manque d'infrastructure pour acheminer les produits pétroliers de l'Ouest vers les marchés de l'Est, le Canada importe également du pétrole et du gaz naturel des États-Unis (ONÉ, 2014). En 2014, ces derniers ont dépassé l'Algérie comme plus gros fournisseurs de pétrole brut du Canada (ONÉ, 2014).

Le réseau électrique compte davantage de connexions entre le Canada et les États-Unis qu'entre les provinces elles-mêmes, et les connexions interprovinciales ont généralement une capacité plus faible que les connexions entre les provinces et les États (ACG, 2012b). De nouveaux investissements dans les connexions de transport interprovinciales pourraient faciliter l'accroissement du commerce d'électricité à l'intérieur du Canada et mener à des réductions d'émissions pour certaines provinces (ACG, 2012b, 2014). Cependant, à ce jour, le commerce d'électricité nord-sud entre les provinces canadiennes et les États américains est généralement plus économique, parce que les exportations d'électricité permettent des prix plus élevés (Goodman, 2010)<sup>7</sup>.

Toutefois, les inquiétudes soulevées par la dépendance excessive à un seul marché d'exportation ainsi que par l'état du marché mondial et par le regain de production pétrolière et gazière en Amérique du Nord ont incité le gouvernement fédéral canadien et certains gouvernements provinciaux à viser l'expansion des exportations de pétrole et de gaz vers les marchés étrangers. Les projets de pipeline d'acheminement du bitume des sables bitumineux de l'Alberta aux réservoirs de stockage des côtes Ouest et Est, tels que les projets d'oléoduc Northern Gateway d'Enbridge, d'expansion TransMountain de Kinder Morgan, d'oléoduc Énergie Est de TransCanada et d'inversion de la conduite 9 (initiative d'accès aux raffineries de l'Est du Canada), sont considérés comme des investissements d'infrastructure cruciaux pour l'accès aux marchés asiatiques et européens en pleine croissance. La Colombie-Britannique prévoit elle aussi l'exportation de gaz naturel liquéfié (GNL). Ces projets accroîtraient la capacité d'exportation du Canada de produits énergétiques vers l'Asie et l'Europe, mais ils soulèvent aussi des craintes quant aux impacts environnementaux possibles (Palen *et al.*, 2014).

---

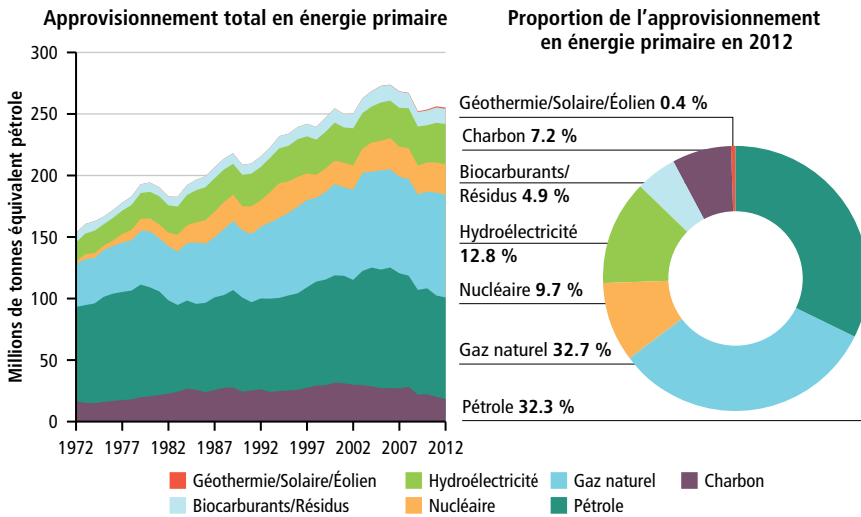
7 Historiquement, une des raisons des exportations d'électricité est aussi le fait qu'au Canada, la pointe de la demande se situe en hiver, alors qu'elle survient en été aux États-Unis, ce qui favorise le commerce. Mais cette règle pourrait se révéler moins vraie dans le futur, si davantage de régions canadiennes vivent leur demande de pointe en été en raison de la hausse des besoins pour la climatisation (Goodman, 2010).

### 2.2.3 Offre et utilisation nationales d'énergie

Comme dans la plupart des pays, les besoins énergétiques au Canada sont actuellement satisfaits principalement par les combustibles fossiles. Comme l'illustre la figure 2.4, le pétrole et le gaz naturel représentent chacun environ un tiers des sources d'énergie primaire du pays, soit la somme de la production nationale et des importations à laquelle sont soustraites les exportations. Le charbon est loin derrière avec 7 %. L'hydroélectricité et l'énergie nucléaire jouent également un rôle important, la première fournissant la majeure partie de l'électricité canadienne et la seconde étant une source majeure d'électricité en Ontario. La biomasse sert de source d'énergie principalement dans le secteur de la foresterie pour la production de pâtes et papiers et de bois d'œuvre (RNCAN, 2014g). Les sources d'énergie renouvelable, comme le solaire et l'éolien, n'ont qu'une faible importance dans l'approvisionnement énergétique au Canada, bien qu'elles aient connu une croissance rapide ces dernières années. Si la place du gaz naturel dans la combinaison énergétique canadienne a graduellement augmenté tandis que celle du charbon a décliné, la dépendance générale du Canada aux combustibles fossiles est relativement stable depuis 40 ans.

Le Canada présente une consommation d'énergie par habitant relativement élevée. Actuellement, cette consommation est la plus forte de tous les pays de l'OCDE, exception faite du Luxembourg et de l'Islande (Banque mondiale, 2015). Une des principales raisons de cette situation est les revenus par habitant relativement élevés associés à des ressources énergétiques abondantes et à des prix de l'énergie bas. Les prix de l'électricité, du gaz naturel et de l'essence y sont parmi les plus faibles de l'OCDE (voir la figure 2.5). Les différences de prix sont particulièrement élevées dans le secteur résidentiel, où les foyers de pays européens tels que le Danemark et l'Allemagne font face à des prix de l'électricité plus de trois fois plus élevés que la moyenne des tarifs du Canada (AIE, 2014a).

Toutefois, d'autres facteurs influencent aussi la demande énergétique canadienne. Un climat variable requiert une forte consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation. La structure industrielle du Canada, qui fait la part belle au secteur des ressources naturelles (p. ex., hydrocarbures, mines, agriculture et foresterie) est elle aussi gourmande en énergie. Les besoins énergétiques du transport sont le reflet de l'immense masse terrestre du pays. Enfin, les choix politiques effectués par les gouvernements fédéraux et provinciaux successifs (politiques climatiques, normes fédérales de consommation de carburant et codes du bâtiment provinciaux) ont aussi façonné au fur et à mesure les tendances en matière d'utilisation de l'énergie du Canada.



D'après AIE (2014b); données tirées de l'Energy Statistics Service de l'AIE © OCDE/AIE 2014, IEA Publishing; modifiées par le Conseil des académies canadiennes. Licence : <http://www.iea.org/t&c/termsandconditions/>.

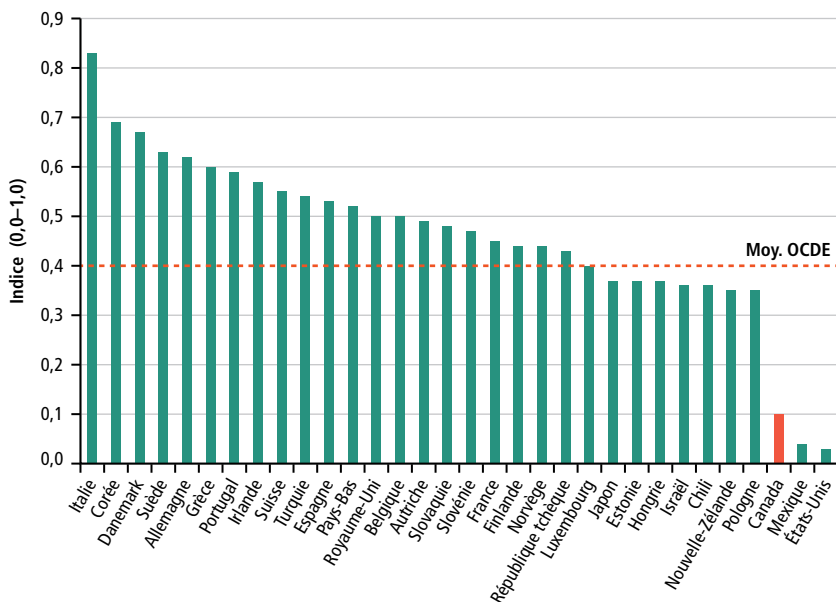
Figure 2.4

### Approvisionnement total en énergie primaire au Canada par source, 1972–2012

Comme la plupart des pays, le Canada compte depuis longtemps sur les combustibles fossiles pour répondre à la majeure partie de ses besoins énergétiques. D'importants changements sont intervenus dans la combinaison énergétique canadienne durant la période, notamment le recours de plus en plus grand au gaz naturel et l'introduction de l'énergie nucléaire dans les années 1970 et 1980. Les énergies renouvelables, comme le solaire, l'éolien et la géothermie, ne fournissent encore qu'une infime partie de l'approvisionnement énergétique du Canada. L'approvisionnement total en énergie primaire est la somme de la production nationale et des importations moins les exportations et exclut le commerce de l'électricité. La tourbe et le pétrole de schiste sont agrégés au charbon lorsque c'est pertinent. Les valeurs sont indiquées en millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep). 1 Mtep est égale à 42 pétajoules. Par souci de lisibilité, les proportions inférieures à 0,1 % ne sont pas incluses et donc, le total peut ne pas être de 100 %.

### Croissance de la demande énergétique au Canada

Les projections de croissance de la demande énergétique se heurtent à d'immenses incertitudes et doivent donc être utilisées avec prudence. Les changements en matière de technologie, de politiques publiques, de conjoncture économique, de normes sociales et culturelles et d'état des marchés mondiaux des produits énergétiques peuvent avoir des effets importants et imprévisibles sur le futur de la demande. Les prévisions pour le Canada dépendent aussi de la manière dont les conditions économiques et politiques climatiques futures influenceront sur la croissance industrielle, particulièrement dans les secteurs exportateurs grands consommateurs d'énergie, comme les sables bitumineux. Toutefois, les projections actuelles portent à croire que la demande énergétique



Source de données : Calcul du comité d'experts d'après AIE, 2013, 2014a

Figure 2.5

**Prix de l'énergie dans les pays de l'OCDE (indice), 2013**

Les prix de l'énergie au Canada, tout comme aux États-Unis et au Mexique, sont parmi les plus bas des pays de l'OCDE. La figure illustre l'indice des prix de l'énergie fondé sur le prix du diesel, de l'essence sans plomb, du gaz naturel destiné à l'industrie, du gaz naturel destiné aux foyers, de l'électricité destinée à l'industrie et de l'électricité destinée aux foyers. Les données correspondent aux prix en 2013, sauf pour l'électricité canadienne, qui correspondent aux prix de 2012.

globale au Canada continuera à augmenter dans les années à venir. L'ONÉ et l'Energy Information Administration (EIA) des États-Unis prévoient que la demande globale en énergie au Canada croîtra à un taux de 1 à 1,1 % par an, soit en gros le double de la moyenne projetée pour les pays de l'OCDE (EIA, 2013; ONÉ, 2013).

La croissance économique et la croissance démographique sont des paramètres fondamentaux de la demande énergétique. Les projections de la demande canadienne reposent sur l'hypothèse que l'économie continuera à croître d'environ 2 % par an (ONÉ, 2013). Ces dernières années, elle a dépassé celle des autres pays du G7 (Banque mondiale, 2015), ce qui a contribué au taux comparativement élevé d'augmentation de la consommation d'énergie. Les modifications de la structure de l'économie canadienne ont également un effet sur l'évolution de la demande énergétique — bien que des tendances opposées se contrebalancent mutuellement en partie, à l'exemple de l'intensification de

l'activité dans le secteur des hydrocarbures gros consommateur d'énergie qui est compensée par la baisse de la production des industries manufacturières, elles aussi exigeantes en énergie. Par conséquent, ces changements ont eu un modeste effet à la baisse sur la consommation énergétique globale (RNCAN, 2013). Le Canada a aussi connu une croissance démographique relativement élevée si on la compare à celle de la plupart des pays développés, ce qui traduit la forte immigration. Dans un même temps, la population canadienne a vieilli et la proportion de personnes en âge de travailler devrait baisser dans les décennies à venir, ce qui atténuera la croissance économique et la hausse de la demande en énergie (ONÉ, 2013).

### **2.3 ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE D'ORIGINE ÉNERGÉTIQUE DU CANADA**

Les émissions de gaz à effet de serre du Canada ont grandement augmenté depuis 1990, bien que les gouvernements aient successivement fixé plusieurs cibles de réduction des émissions et adopté plusieurs politiques climatiques. En 2013, les émissions totales de ces gaz (émissions dues aux changements d'affectation des terres exclues) étaient de 18 % supérieures à leur niveau de 1990 (Environnement Canada, 2015c). Le Canada n'a pas respecté ses cibles de réduction des émissions auxquelles il s'était engagé à la réunion du G7 de 1988, à la Conférence mondiale sur L'Atmosphère en évolution de 1988, au Sommet de la Terre de 1992 et en vertu du Protocole de Kyoto (Rivers et Jaccard, 2009). Une analyse récente laisse penser que cette tendance se poursuivra, car il est improbable que le Canada atteigne la cible qu'il s'est fixée dans le cadre de l'Accord de Copenhague, soit une réduction de 17 % d'ici à 2020 par rapport au niveau de 2005 (Environnement Canada, 2013c; CEDD-BVG, 2014).

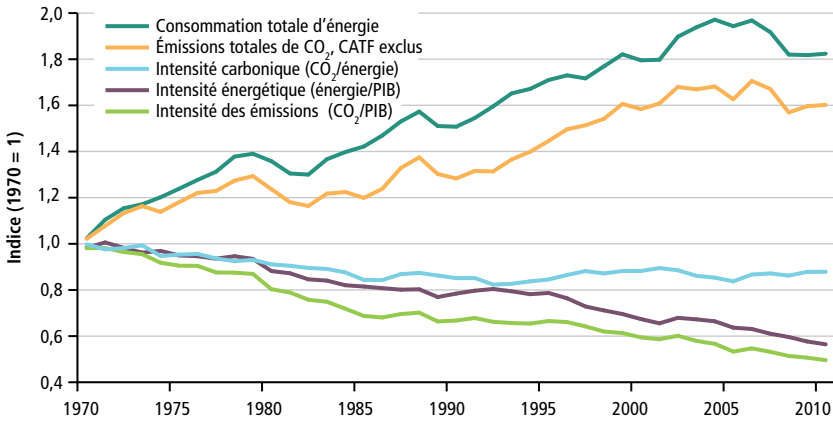
Les émissions de dioxyde de carbone causées par l'emploi de combustibles constituent la majorité des émissions canadiennes de gaz à effet de serre et ont constamment augmenté avec l'accroissement de la demande énergétique (RNCAN, 2013; Environnement Canada, 2015c). La croissance des émissions découlant de la production et de l'utilisation d'énergie est le fruit de multiples facteurs sous-jacents, notamment la croissance démographique, la croissance économique, l'intensité énergétique de l'économie et l'intensité des émissions dues à l'utilisation d'énergie (Kaya, 1990). Tous ces facteurs influent sur les émissions, quoique certains relèvent plus de la politique. Les gouvernements sont généralement peu disposés à manipuler la croissance démographique, le revenu par habitant et la structure de l'économie dans le but de réduire les émissions (Rivers et Jaccard, 2009). L'attention politique se porte donc sur l'intensité énergétique de l'économie et sur l'intensité des émissions dues à l'utilisation d'énergie.

La figure 2.6 illustre la tendance à long terme de l'intensité énergétique et de l'intensité des émissions au Canada. L'énergie nécessaire pour produire un dollar de produit intérieur brut (PIB) a sensiblement baissé depuis 1970, ce qui traduit les améliorations de l'efficacité énergétique et les changements dans la structure de l'économie (comme le repli des secteurs énergivores et la croissance du secteur des services). Une analyse réalisée par RNCan (2013) a révélé que l'amélioration de l'efficacité énergétique était responsable de la baisse de moitié de la croissance de l'utilisation d'énergie entre 1990 et 2010, et que l'ampleur des économies ainsi réalisées était bien plus grande que les économies découlant des changements dans la structure de l'économie. Durant la même période, le volume d'émissions par unité d'énergie a légèrement baissé, ce qui reflète les changements dans la combinaison énergétique, qui a délaissé les combustibles fossiles pour des sources moins émettrices. En conséquence de ces tendances, l'intensité globale des émissions de l'économie canadienne est à présent à peu près la moitié de ce qu'elle était en 1970. Cependant, l'utilisation d'énergie totale et les émissions de dioxyde de carbone ont constamment augmenté durant la même période, parce que la demande croissante en énergie et la continuation du recours à des sources énergétiques relativement émettrices ont fait plus que compenser les réductions réalisées. La croissance modérée des émissions dues à la production d'énergie demeurera probablement un défi à cause des forts taux relatifs de croissance démographique et de croissance économique (Rivers et Jaccard, 2009).

La consommation d'énergie et les émissions ne suivent pas des tendances uniformes dans toute l'économie canadienne. Elles peuvent être réparties en quatre grands secteurs : électricité, transport, bâtiment (qui englobe la consommation d'énergie résidentielle, commerciale et institutionnelle) et l'industrie. La figure 2.7 illustre la demande énergétique canadienne totale dans les trois secteurs d'utilisation finale (transport, bâtiment et industrie) en 1990 et 2012, tandis que la figure 2.8 représente les émissions de gaz à effet de serre d'origine énergétique pour les quatre secteurs, durant la même période<sup>8</sup>.

---

8 Les données utilisées dans ces figures sont tirées de la Base de données nationale sur la consommation d'énergie de Ressources naturelles Canada, qui procure un ensemble cohérent de renseignements sur l'énergie et sur les émissions pour tous les secteurs d'utilisation finale. Les chiffres concernent les émissions produites par la combustion à des fins énergétiques, mais n'incluent pas celles provenant d'autres sources, telles que les émissions fugitives et les émissions des procédés industriels. Par conséquent, ils diffèrent des chiffres officiels sur les émissions fournis par le rapport d'inventaire national d'Environnement Canada. Les différences d'attribution des émissions entre les secteurs produisent d'autres écarts (NRCan, 2014c). Le lecteur désireux de connaître les toutes dernières données officielles sur les émissions pour le Canada est encouragé à consulter Environnement Canada (2015c).

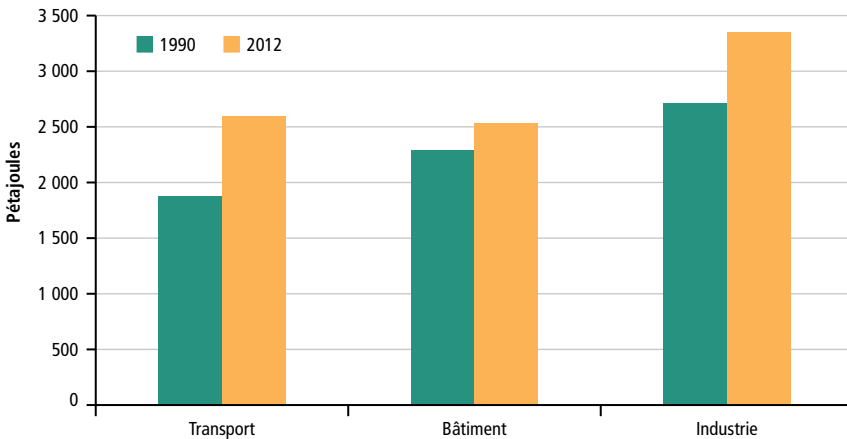


Source de données : WRI, 2014

Figure 2.6

### Tendances canadiennes en matière d'énergie et d'émissions, 1970–2011

Ces quarante dernières années, le volume d'énergie requis pour produire un dollar d'extrant économique a constamment baissé, tout comme les émissions de dioxyde de carbone par unité d'énergie et, par conséquent, par dollar. En même temps, la consommation totale d'énergie et les émissions totales ont continué à augmenter à mesure que le rythme de la croissance économique dépassait celui des gains d'efficacité. CATF signifie « changements d'affectation des terres et foresterie ».

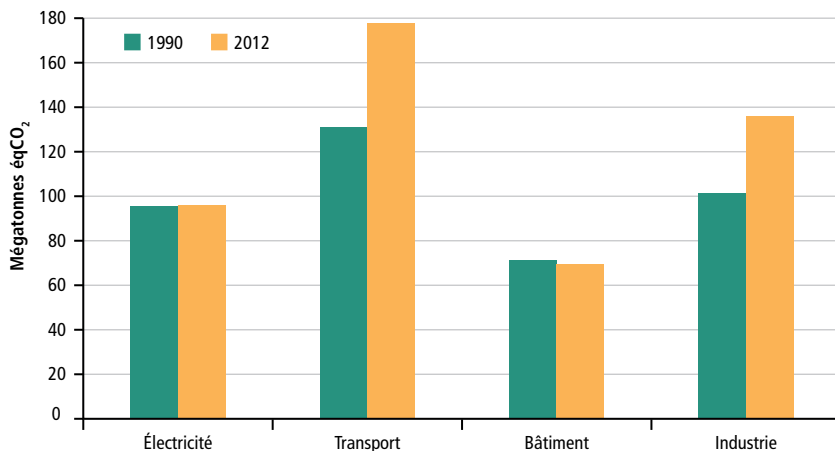


Source des données : RNCan, 2014h

Figure 2.7

### Utilisation finale de l'énergie par secteur au Canada, 1990 et 2012

Essentiellement, l'utilisation de l'énergie au Canada se répartit de façon presque égale en trois secteurs: transport, bâtiment (résidentiel, commercial et institutionnel) et industrie. C'est dans les secteurs du transport et de l'industrie que la croissance de la demande énergétique a été la plus forte.



Source des données : RNCan, 2014h

Figure 2.8

### Émissions de gaz à effet de serre d'origine énergétique par secteur, 1990 et 2012

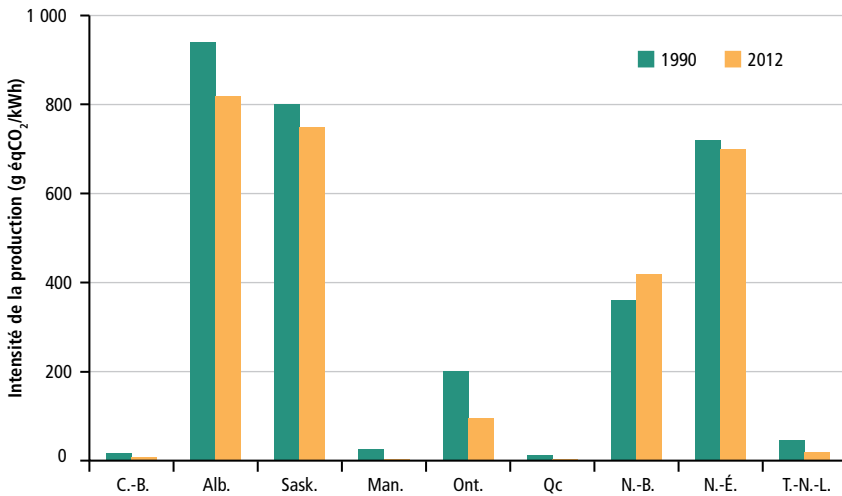
Les émissions de gaz à effet de serre d'origine énergétique ont augmenté dans le transport et l'industrie depuis 1990. Elles ont cependant baissé dans le secteur du bâtiment durant la même période.

#### 2.3.1 Électricité

Les émissions de gaz à effet de serre dues à la production d'électricité ont atteint un sommet en 2003 au Canada et ont depuis baissé lentement, en raison de la forte baisse du recours au charbon et au pétrole (Environnement Canada, 2015c). Les réseaux électriques de la Colombie-Britannique, du Manitoba et du Québec reposent presque entièrement sur l'hydroélectricité. L'Île-du-Prince-Édouard compte à présent considérablement sur l'énergie éolienne et sur les importations. En Ontario, le secteur de l'électricité a réduit ses émissions grâce à la décision du gouvernement provincial de fermer ses centrales électriques au charbon. Par conséquent, les émissions dues à la production d'électricité au Canada sont approximativement au niveau qu'elles avaient en 1990 et sont de plus en plus concentrées dans quatre provinces : Alberta, Saskatchewan, Nouveau-Brunswick et Nouvelle-Écosse (figure 2.9).

#### 2.3.2 Transport

Le transport est le secteur où la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre croissent le plus vite au Canada. L'énergie est utilisée pour le transport routier, aérien, ferroviaire et maritime, et pratiquement tous les réseaux de transport actuels dépendent des combustibles fossiles pour leur carburant.



Source de données : Environnement Canada, 2014

Figure 2.9

### Intensité des émissions de gaz à effet de serre de la production d'électricité par province, 1990 et 2012

La plupart des provinces canadiennes produisent leur électricité à partir de sources à faibles émissions. Seuls l'Alberta, la Saskatchewan, le Nouveau-Brunswick et la Nouvelle-Écosse emploient encore le charbon pour une bonne partie de leur électricité. Les émissions de la production d'électricité en Ontario ont constamment baissé ces dernières années en raison de la fermeture des centrales au charbon, et des données plus récentes révéleraient une baisse encore plus grande, puisque la dernière centrale a fermé ses portes en 2014. L'intensité des émissions de l'Î.-P.-É. n'est pas représentée, car la province importe la majeure partie de son électricité du Nouveau-Brunswick.

La croissance de la consommation d'énergie et des émissions à des fins de transport au Canada suit plusieurs tendances. La demande énergétique du transport de marchandises par voie routière, en particulier, a rapidement augmenté ces dernières années, la majorité de cette demande provenant de l'utilisation accrue des camions lourds (RNCAN, 2013). La demande de carburant diesel a augmenté de 73 % au pays entre 1990 et 2010; durant la même période, les émissions produites par le transport de marchandises ont augmenté de 77 %. Une des principales raisons de la hausse du recours au camionnage est l'adoption de la livraison et du stockage juste à temps dans de nombreuses entreprises (RNCAN, 2013). Toutefois, l'amélioration de l'efficacité énergétique a partiellement compensé ces augmentations dans le secteur (RNCAN, 2013).

La consommation d'énergie et les émissions du transport de voyageurs ont aussi augmenté, quoique moins rapidement, ce qui traduit une variété de tendances sous-jacentes. En général, pour les véhicules légers (soit le principal mode de

transport de voyageurs), l'importante hausse de la demande de transport (qui a entraîné une augmentation du nombre de passagers-kilomètre transporté) a été partiellement compensée par l'accroissement de l'efficacité des véhicules. Toutefois, davantage de Canadiens conduisent également de plus gros véhicules. En 2010, les camionnettes représentaient 46 % des nouveaux véhicules vendus, contre 26 % en 1990 (RNCAN, 2013). Les Canadiens voyagent aussi plus par les airs (RNCAN, 2013). L'effet net est une croissance continue de la consommation d'énergie et des émissions. Les émissions causées par le transport de voyageurs ont augmenté de 9 % entre 1990 et 2010 (RNCAN, 2014h).

### 2.3.3 Bâtiment

L'énergie consommée dans le secteur du bâtiment sert notamment au chauffage des locaux et de l'eau, à la climatisation, à l'éclairage, à la réfrigération et à la cuisine, et à l'alimentation d'appareils tels que les ordinateurs, les téléviseurs et les électroménagers. La combinaison de sources d'énergie dans ce secteur varie selon l'utilisation finale, la région et la disponibilité locale. L'électricité est une source d'énergie pour de nombreuses applications, mais le gaz naturel est le principal combustible employé pour le chauffage des locaux et de l'eau (qui représente le principal usage de l'énergie dans le bâtiment). Les émissions du bâtiment ont peu varié entre 1990 et 2010, en raison de tendances qui se contrebalancent. La croissance démographique, l'accroissement de la surface utile découlant de la construction de maisons plus grandes, la réduction de la taille des foyers, l'utilisation accrue de la climatisation et l'augmentation du nombre d'ordinateurs, de photocopieurs et autre équipement ont contribué à la hausse de la consommation d'énergie et des émissions. Toutefois, l'amélioration de l'efficacité énergétique (comme la présence accrue des fournaies à haute efficacité au gaz) et le changement de combustible utilisé (p. ex. réduction de l'usage du charbon et du mazout de chauffage) ont entraîné une baisse de la consommation d'énergie et des émissions (Environnement Canada, 2015c). Le résultat net est une faible augmentation de la consommation d'énergie, mais une légère baisse des émissions des bâtiments résidentiels (RNCAN, 2013).

### 2.3.4 Industrie

L'utilisation de l'énergie est principalement due à des secteurs d'activité gros consommateurs, comme la fabrication d'acier et de fer, d'aluminium, de ciment, de produits chimiques, d'engrais et de pâtes et papiers, les mines et les carrières et l'extraction pétrolière et gazière, qui, combinés, représentent 80 % de la demande énergétique industrielle (ONÉ, 2013). Dans l'industrie, l'énergie sert principalement à produire de la chaleur et de la vapeur ou de la force motrice. Les sources d'énergie varient : le gaz naturel est le plus utilisé, mais on a aussi recours à l'électricité, à la biomasse et à d'autres combustibles fossiles, comme le gaz de distillation et le coke de pétrole.

La consommation énergétique et les émissions industrielles ont toutes deux augmenté d'environ 20 % entre 1990 et 2010 (RNCAN, 2013). Toutefois, la tendance est différente selon le secteur d'activité. Certains secteurs, comme l'extraction houillère, le pétrole et le gaz naturel en amont (qui inclut la production de sables bitumineux), la fusion et le raffinage ont connu des hausses importantes de la consommation d'énergie, en raison de l'accroissement de la production. D'autres, tels que les pâtes et papiers, les produits forestiers et d'autres secteurs de la fabrication, ont enregistré une baisse (RNCAN, 2013). Une amélioration substantielle de l'efficacité énergétique dans la plupart des secteurs a également atténué la croissance de la demande énergétique et des émissions (RNCAN, 2013).

Les émissions industrielles ont toutefois considérablement été influencées par l'accroissement de l'exploitation des sables bitumineux (Environnement Canada, 2015c). Le bitume des sables bitumineux est produit par extraction à ciel ouvert ou par la production in situ, qui requiert l'injection de vapeur dans les gisements souterrains, et le pétrole lourd ainsi extrait doit être valorisé ou dilué avec des hydrocarbures légers en vue de son transport. Cette production nécessite de l'énergie et rejette d'énormes quantités d'émissions. Les émissions amont par baril de pétrole brut produit dans les sables bitumineux de l'Alberta sont équivalentes à celles libérées par les autres pétroles bruts lourds produits dans le monde, mais sont significativement supérieures à celles des pétroles bruts conventionnels (Gordon *et al.*, 2015) — bien que les émissions varient selon la qualité du réservoir. Le recours accru à l'extraction in situ à l'avenir entraînera probablement la hausse des émissions absolues et des émissions par baril de pétrole extrait.

L'expansion de la production de pétrole au Canada a provoqué la croissance de la demande énergétique et des émissions découlant de l'extraction, de la transformation et du transport de cette ressource. Si les sables bitumineux représentent 9 % des émissions totales de gaz à effet de serre au Canada, ils sont responsables de 42 % de la croissance totale des émissions canadiennes entre 1990 et 2013 (Environnement Canada, 2015c). Aucun autre secteur d'activité n'a connu une telle hausse des émissions; en fait, les émissions dans la plupart des secteurs au Canada ont baissé durant la même période (RNCAN, 2014h). Les répercussions de l'exploitation des sables bitumineux sont aussi évidentes dans la distribution régionale des émissions au pays : leur croissance est concentrée en Saskatchewan et en Alberta. Par contraste, les émissions ont diminué au Québec et en Ontario depuis 1990, elles ont légèrement augmenté en Colombie-Britannique et sont restées relativement stables dans les provinces atlantiques (Environnement Canada, 2015c). L'extraction et la transformation du pétrole à partir des sables bitumineux ont joué un rôle capital dans la croissance globale des émissions; l'atteinte des vastes réductions d'émissions

à l'échelle nationale du Canada (la question est examinée à la section 3.4) dépendra donc grandement des choix énergétiques et technologiques effectués dans ce secteur.

## 2.4 TRANSITIONS DE SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE

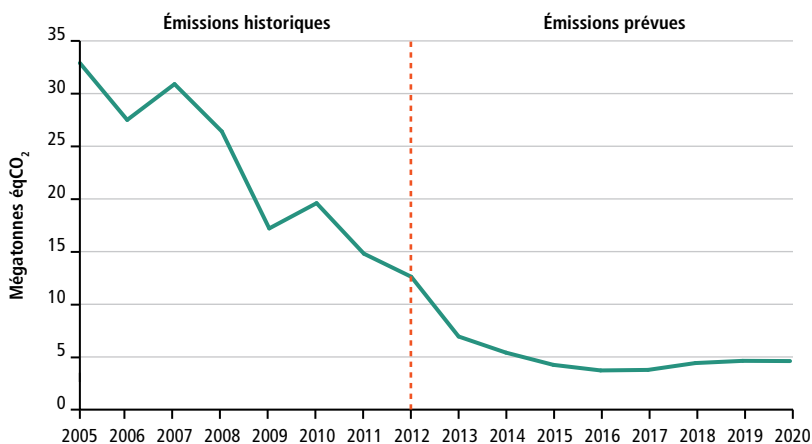
Les transitions du système énergétique exigent normalement plusieurs décennies en raison de la longévité des immobilisations, comme les bâtiments, l'équipement et la machinerie, et de l'infrastructure publique, et parce qu'une fois que les gens se sont habitués à certaines technologies et ont adopté certains comportements, il leur est souvent difficile d'en changer (Grubler, 2012; Bruckner *et al.*, 2014). La durée de vie moyenne d'une centrale au combustible fossile, par exemple, est de 30 à 40 ans (Davis *et al.*, 2010). Les centrales électriques et autres immobilisations peuvent être déclassées avant la fin de leur durée de vie économique, mais l'opération augmente le coût de la réduction des émissions. Cependant, toutes les immobilisations n'ont pas une grande longévité et le taux de renouvellement varie considérablement (Jaccard et Rivers, 2007). Il est possible de réaliser de nombreux changements de sources de combustible en quelques décennies, puisque c'est tout le temps nécessaire pour convertir les chaudières industrielles, les systèmes de chauffage des édifices et les systèmes de propulsion des véhicules. De même, il est possible d'effectuer rapidement certains rattrapages qui auront de profondes répercussions sur les émissions. Comme on l'a vu avec la centrale de Boundary Dam en Saskatchewan, une centrale au charbon peut être dotée en rattrapage d'un dispositif de CSC en l'espace de 5 à 10 ans. Des politiques gouvernementales suffisamment drastiques peuvent entraîner des transitions relativement rapides vers des sources à faibles émissions, bien que le rythme et le coût des réductions variera selon le secteur, la région, le contexte, la technologie et les immobilisations concernées.

Dans le passé, deux transitions notables de système énergétique ont été précipitées par la conjonction du choc des prix de l'énergie et de politiques gouvernementales. Les chocs pétroliers des années 1970 ont provoqué un changement radical du système énergétique en France, où la production d'électricité dépendait à l'époque largement du pétrole importé (PBS, 1997). Confronté à une hausse vertigineuse des prix du pétrole et à des ressources énergétiques nationales réduites, le gouvernement de l'époque s'est résolument lancé dans l'énergie nucléaire. En 15 ans, le pays a construit 56 réacteurs et cette énergie y est rapidement devenue la principale source d'électricité (PBS, 1997; AIE, 2014b). La crise pétrolière a aussi déclenché une transition énergétique majeure au Brésil. En réaction à la hausse du cours du pétrole et à la baisse de celui du sucre, le gouvernement a appuyé avec détermination le développement de l'éthanol de canne à sucre comme carburant de substitution pour le transport. Stimulée par des politiques telles que celles obligeant le mélange éthanol-essence et par le soutien des constructeurs automobiles, la

production d'éthanol a quintuplé entre 1975 et 1979 (Meyer, 2012). En 1979, la première automobile en mesure de rouler à l'éthanol pur a été introduite au Brésil et en 1985, pratiquement tous les nouveaux véhicules vendus dans le pays roulaient avec ce carburant (Furtado *et al.*, 2011; Meyer, 2012). Aujourd'hui, la plupart des véhicules neufs offerts au Brésil sont polycarburants et donnent le choix aux automobilistes d'utiliser l'essence ou l'éthanol selon les conditions du marché (Meyer, 2012).

Au Canada, la fermeture des centrales au charbon ontariennes est un exemple de changement rapide ayant entraîné une réduction massive des émissions. En 2003, l'Ontario produisait environ le quart de son électricité à partir de centrales au charbon; toutefois, cette même année, le gouvernement provincial s'est engagé à déclasser graduellement ces installations — opération qui s'est terminée en 2014 avec la fermeture de la centrale de Thunder Bay. Pour remplacer la perte de capacité de production, de nouvelles centrales au gaz naturel ont été construites (le gaz naturel rejette approximativement moitié moins de dioxyde de carbone que le charbon par unité d'énergie produite) et le gouvernement a adopté la *Loi de 2009 sur l'énergie verte*, qui a aussi accéléré l'exploitation de l'énergie éolienne et d'autres énergies renouvelables dans toute la province. Les émissions de dioxyde de carbone dues à la production d'électricité ont ainsi baissé d'environ 85 % en 10 ans, et devraient rester faibles (figure 2.10). Le prix de l'électricité résidentielle a augmenté de 2,86 % par an en valeur réelle entre 2000 et 2010, conséquence partielle du coût de l'ajout de la nouvelle capacité de production. Cependant, la hausse du prix découle également des investissements dans les réseaux de transport et de distribution; elle correspond à une tendance à long terme qui résulte du fait que la province continue à développer sa production électrique hors du cadre de ses sources à bas coût traditionnelles comme l'hydroélectricité (Deweese, 2012).

Les transitions énergétiques passées permettent de tirer d'autres leçons intéressantes pour la réduction des émissions. Elles sont le plus souvent survenues en réaction à des changements technologiques et institutionnels concernant l'utilisation finale de l'énergie et la demande (Grubler, 2012). Les progrès technologiques permettant des services énergétiques entièrement nouveaux ou grandement améliorés (p. ex. éclairage à l'électricité au lieu des chandelles, transport automobile au lieu du transport tiré par des hommes ou des animaux) ont transformé la consommation d'énergie et les systèmes d'approvisionnement en énergie (p. ex. construction de réseaux et de centrales électriques, développement des secteurs de la production pétrolière et du raffinage). Les nouveaux procédés sont au départ plus coûteux et moins polyvalents que les solutions conventionnelles et relégués à des marchés de niche (Grubler, 2012); les transitions soutenues se produisent donc en général seulement quand une nouvelle technologie devient moins coûteuse que la



Reproduit avec la permission du gouvernement de l'Ontario, 2014

Figure 2.10

### Émissions historiques et prévues de la production électrique en Ontario

La décision du gouvernement ontarien de fermer toutes les centrales au charbon de la province a été le point de départ d'une baisse marquée des émissions dues à la production d'électricité pendant 10 ans.

technologie en place (Fouquet, 2010; Fouquet et Pearson, 2012). Une des conséquences pour l'atténuation des émissions est que les procédés qui procurent des avantages tangibles aux utilisateurs finaux ont plus de chance de déclencher des transitions énergétiques que ceux qui concernent l'approvisionnement et n'offrent pas d'avantage perceptible à ces mêmes utilisateurs finaux (Grubler, 2012). L'histoire montre aussi que les régions et les économies sont enclines à sauter des transitions énergétiques à cause de l'effet de verrouillage. En Europe, les pays les plus lents à adopter le charbon comme principale source d'énergie au XIX<sup>e</sup> siècle sont passés plus rapidement à l'électricité, au pétrole et au gaz au XX<sup>e</sup> siècle (Grubler, 2012). Aujourd'hui, les pays en développement pourraient de même adopter plus rapidement les sources et technologies énergétiques à faibles émissions, car le rôle des combustibles fossiles dans leur système énergétique est moins ancré.

Aux gouvernements qui cherchent à promouvoir la transition du système énergétique, Grubler (2012) recommande de tenir compte de trois facteurs fondamentaux pour élaborer des politiques efficaces : la persistance, l'harmonisation et l'équilibre. Les politiques doivent être persistantes parce que les transitions prennent souvent plusieurs décennies. Des politiques ambitieuses, mais inconstantes et discontinues ont peu de chances de favoriser une transition soutenue à long terme — une caractéristique particulièrement importante dans les systèmes énergétiques urbains, en raison de la longueur des délais

nécessaires pour modifier l'environnement bâti (voir l'encadré 2.3). Toutefois, les retards dans l'adoption de politiques d'atténuation augmentent les coûts de la réduction des émissions en encourageant la poursuite des investissements dans l'infrastructure à fortes émissions. L'harmonisation des politiques est nécessaire en raison de la multitude de secteurs, d'institutions, de procédés et de personnes intervenant dans le système énergétique. La fréquente coexistence des subventions à la fois pour les secteurs fonctionnant aux combustibles fossiles et pour les nouveaux dispositifs à énergie renouvelable est un excellent exemple de mauvaise harmonisation des politiques. Enfin, l'équilibre est nécessaire en raison de l'incertitude technologique et des risques associés qui caractérisent souvent les transitions de système énergétique. Aucune source ou technologie énergétique à faibles émissions seule n'entraînera des réductions dans toutes les situations, et la difficulté à réduire les émissions dépend du nombre et du coût des technologies de rechange. Face à ces incertitudes, les gouvernements prudents doivent souvent s'appuyer sur un portefeuille diversifié de procédés et de stratégies de transition.

## 2.5 RÉSUMÉ

Dans les sociétés industrialisées, les systèmes énergétiques sont composés d'un vaste éventail de ressources, de processus et de procédés qui transforment l'énergie de sources primaires en services utiles, tels que l'éclairage, le mouvement et la chaleur. De grandes quantités d'énergie sont perdues durant la transformation, et l'amélioration de l'efficacité dans l'ensemble du système énergétique peut atténuer la croissance de la demande en énergie et réduire les émissions produites pour y répondre.

Le système énergétique canadien est similaire à celui des autres économies industrialisées, en ce qu'il dépend des combustibles fossiles pour satisfaire la majorité de ses besoins et qu'il rejette d'importantes quantités de dioxyde de carbone dans l'atmosphère quand ces combustibles sont brûlés. Au Canada, les combustibles fossiles sont la source prédominante d'énergie pour les réseaux de transport (par le biais de produits pétroliers raffinés, comme l'essence et le diesel), le chauffage des locaux (par l'intermédiaire des fournaies au gaz naturel) et la production de chaleur et l'alimentation de certains procédés industriels. En revanche, le pays bénéficie d'un réseau électrique à émissions relativement faibles, qui repose fortement sur l'hydroélectricité et, dans le cas de l'Ontario, sur l'énergie nucléaire.

Le Canada affiche une consommation plutôt forte d'énergie par habitant, ce qui traduit la richesse de ses habitants, les prix relativement bas de l'énergie et d'autres facteurs, tels que son climat variable, son immense masse terrestre et une économie basée sur les ressources naturelles et sur d'importantes

### Encadré 2.3

#### Transitions énergétiques et aménagement urbain

La majeure partie de la population mondiale vit à présent en zone urbaine et la situation s'intensifie rapidement à mesure que les habitants des pays en développement migrent des régions rurales vers les grandes villes (Grubler *et al.*, 2012b). Résultat, la proportion de l'énergie consommée dans les villes augmente de plus en plus; selon les experts, elle serait de 60 à 80 %. De nombreux éléments de la configuration des villes, comme les réseaux de transport, les politiques sur le zonage, l'aménagement urbain, les services municipaux, les logements, les codes du bâtiment et la densité de population, ont des répercussions sur la consommation énergétique et sur les systèmes d'approvisionnement citadins. Admettre les relations spatiales et sociales entre ces dimensions peut faciliter les transitions à des systèmes énergétiques plus efficaces — et peut-être plus résilients.

Un aménagement urbain promouvant des collectivités relativement denses situées au même endroit que les services essentiels peut améliorer l'efficacité énergétique à l'échelle macroscopique et réduire la demande énergétique liée au transport. La concentration des services requis dans les villes engendre des économies d'échelle et rend viables les nouvelles technologies énergétiques. Les systèmes de chauffage de quartier, par exemple, dépendent de la demande partagée de services énergétiques (chaleur) dans une zone circonscrite. De même, les villes regroupent les déchets, ce qui peut accroître la viabilité des procédés énergétiques utilisant cette ressource, comme la production de biogaz à partir des eaux usées. Des réseaux de transport public plus efficaces peuvent réduire la pollution de l'air et ses répercussions sur la santé ainsi que la congestion routière, améliorant de cette façon la productivité et la qualité de vie des résidents. L'augmentation de l'efficacité des systèmes urbains de traitement de l'eau et des eaux usées peut entraîner d'importantes économies d'énergie. Enfin, les villes recourent parfois à des réseaux de production d'électricité décentralisée, ce qui peut améliorer la résilience des réseaux électriques locaux et réduire les pertes dans le réseau de transport. Pour un examen des systèmes énergétiques urbains, voir Grubler *et al.* (2012b).

exportations. La forte croissance économique et démographique et l'expansion de la production de sables bitumineux ont provoqué la hausse des émissions ces dernières décennies, ce qui a empêché le pays d'atteindre une série de cibles d'émissions nationales. Pour ces raisons, selon les projections, les émissions provenant de la production d'énergie au Canada devraient continuer à augmenter si les technologies énergétiques à faibles émissions ne sont pas adoptées à grande échelle et si aucune politique d'atténuation des gaz à effet de serre stricte n'est mise en place.

# 3

## **Vers un système énergétique à faibles émissions : solutions énergétiques et technologiques**

- **Électricité**
- **Transport**
- **Bâtiment**
- **Industrie**
- **Résumé**

### 3 Vers un système énergétique à faibles émissions : solutions énergétiques et technologiques

#### Principales constatations

- L'électricité à faibles émissions est la base des réductions à l'échelle de l'économie dans le transport, le bâtiment et l'industrie. Si le Canada profite déjà d'une production électrique relativement peu émettrice, les installations de production à fortes émissions devront être remplacées et toutes les provinces devront développer leur capacité de production d'électricité rejetant peu d'émissions pour répondre à la demande croissante et permettre d'autres réductions.
- Au Canada, les solutions particulièrement prometteuses pour réduire les émissions dans le transport sont l'amélioration constante de l'efficacité de tous les véhicules; l'augmentation du recours à l'électricité à faibles émissions pour le transport de voyageurs; l'élargissement de l'utilisation des biocarburants dans le transport de marchandises; l'aménagement urbain; et les investissements dans l'infrastructure de transport à long terme.
- Améliorer la conception des bâtiments peut réduire la demande énergétique pour le chauffage et la climatisation de 60 à 90 % par rapport aux procédés conventionnels et faciliter le passage à l'électricité à faibles émissions pour le chauffage. Cette amélioration peut prendre la forme du recours au chauffage solaire passif; d'une meilleure isolation; et de l'emploi de thermopompes à air et à eau et de pompes géothermiques.
- Dans l'industrie, un meilleur entretien de l'équipement, l'intégration industrielle et la réduction de l'utilisation de l'énergie pour la transformation des matériaux peuvent contribuer à réduire les émissions. L'électricité, la biomasse et les combustibles fossiles avec CSC peuvent tous servir de sources d'énergie à faibles émissions, selon le contexte.

Le système énergétique canadien continue à recourir à des sources d'énergie fortement émettrices; cependant, des technologies à faibles émissions sont à présent accessibles dans les grands secteurs et pour la plupart des utilisations nécessitant de l'énergie. Par conséquent, la possibilité de réduire les émissions dans la majorité des domaines est de plus en plus réelle. Trois principales stratégies peuvent être mises en œuvre :

- L'*amélioration de l'efficacité énergétique* permet de réduire les émissions en limitant la demande énergétique et le volume de combustibles fossiles utilisés pour la satisfaire. Il existe plusieurs façons d'y parvenir : améliorer l'efficacité technologique, encourager les économies d'énergie et mieux

intégrer les systèmes énergétiques. On peut aussi réaliser des gains d'efficacité grâce à des changements dans la façon dont les services sont fournis, par exemple en abandonnant la voiture au profit des transports en commun pour ses déplacements.

- *L'adoption des procédés de captage et stockage du carbone.* Ces procédés transforment les combustibles fossiles en sources énergétiques à faibles émissions par le captage des émissions de dioxyde de carbone, puis leur transport et leur stockage dans un dépôt géologique adéquat, comme un aquifère salin en profondeur ou un champ pétrolifère. Le recours au CSC est particulièrement adapté aux sources d'émissions de grandes dimensions et fixes, telles que les centrales électriques, les installations de valorisation des sables bitumineux, les usines d'engrais, les usines pétrochimiques et les cimenteries.
- *La substitution interénergétique.* Ce procédé consiste à passer des sources à combustibles fossiles à des sources d'énergie renouvelable et autres sources énergétiques à faibles émissions. Elle peut entraîner des réductions des émissions à divers points de la chaîne d'approvisionnement en énergie. Par exemple, abandonner les centrales à combustible fossile pour des procédés à base d'énergie renouvelable permet d'abaisser les émissions pendant la production d'électricité, alors que dans le transport, adopter les biocarburants ou l'électricité peut engendrer des réductions des émissions au point d'utilisation.

Ce chapitre étudie les sources et technologies énergétiques plus susceptibles d'être employées dans la mise en application de ces stratégies dans quatre secteurs : l'électricité, le transport, le bâtiment et l'industrie. Il présente également les procédés énergétiques qui, selon le comité d'experts, sont les plus prometteurs dans le contexte canadien, décrit les facteurs systémiques qui influent sur les perspectives pour ces procédés et cerne les modifications à l'infrastructure et aux systèmes énergétiques qui pourraient faciliter une adoption plus répandue des sources et technologies énergétiques à faibles émissions dans le futur.

### 3.1 ÉLECTRICITÉ

#### Principales constatations

- Environ 80 % de la population canadienne vit dans des provinces ou territoires qui profitent déjà d'un réseau électrique à faibles émissions. Toutefois, la réduction des émissions dans le futur nécessitera que toutes les provinces effectuent la transition vers la production faiblement émettrice.
- L'amélioration de l'efficacité des centrales à combustible fossile et des réseaux de transport et de distribution d'électricité est un moyen de réduire l'intensité des émissions, mais il est peu probable qu'elle entraîne des réductions de grande ampleur.
- Les technologies de CSC, qui subissent actuellement des tests commerciaux au Canada, pourraient jouer un rôle important dans la réduction des émissions. Cependant, leur déploiement à grande échelle nécessiterait de surmonter certaines difficultés, dont son coût en capital élevé, l'amointrissement de l'efficacité des centrales et la nécessité d'entretenir une infrastructure de distribution et de stockage.
- Le passage à des sources d'électricité à faibles émissions doit prendre en considération les répercussions sur les coûts de l'électricité et la fiabilité du système. Sans politique d'atténuation des émissions, les procédés à faibles émissions demeurent la plupart du temps plus coûteux que les solutions employant des carburants fossiles. Cependant, une transition graduelle vers un ensemble de technologies à faibles émissions sur plusieurs décennies n'imposerait pas une charge trop lourde à la plupart des consommateurs et des entreprises.
- En raison des difficultés de gestion du système posées par l'inclusion accrue de la production d'électricité à partir de sources intermittentes, il faudra recourir à une planification intégrée mettant l'accent sur la constitution d'une combinaison souple de sources énergétiques et sur l'accroissement de la capacité de stockage de l'énergie pour le réseau. Investir dans les réseaux de transport et de distribution d'électricité — lignes de transport, interconnexions et modernisation du réseau comprises — peut également améliorer la flexibilité et accroître le recours aux procédés de production à faibles émissions. L'expérience souligne l'importance de la participation de la collectivité à la planification et au développement énergétiques.

Aménager des réseaux électriques à faibles émissions est crucial si l'on veut plus facilement généraliser la réduction des émissions, pour deux raisons. Premièrement, lorsque les réseaux électriques dépendent des combustibles fossiles et des centrales thermiques conventionnelles pour la production, celle-ci est responsable d'une grande partie des émissions. Par exemple, en Alberta et en Saskatchewan, la production d'électricité est la source d'environ 18 et 21 %, respectivement, des émissions de gaz à effet de serre provinciales

(Environnement Canada, 2015c). Deuxièmement, la disponibilité de l'électricité à faibles émissions permet de réduire les rejets dans d'autres secteurs, car ces derniers peuvent alors délaissier les combustibles fossiles comme source d'énergie au profit de l'électricité (comme dans le cas du remplacement d'un véhicule à essence par un véhicule électrique). Les modèles étudiant les scénarios de fortes réductions d'émissions, par exemple, révèlent souvent que l'électrification de l'énergie consommée dans tous les secteurs joue un rôle essentiel dans les réductions à l'échelle du système (J&C Nyboer and Associates Inc., 2008; Bataille *et al.*, 2014; GIEC, 2014b; Sachs *et al.*, 2014).

Pour le Canada dans son ensemble, la production d'électricité est déjà dominée par les sources à faibles émissions. En raison de l'abondance de l'hydroélectricité, de l'énergie nucléaire en Ontario et des politiques sur l'électricité provinciales, environ 80 % de la population canadienne vit dans des provinces ou territoires qui profitent déjà d'un réseau électrique à émissions relativement faibles (Statistique Canada, 2014; Environnement Canada, 2015c)<sup>9</sup>. Cependant, comme le note le chapitre 2, les sources d'énergie pour la production d'électricité varient selon la région. À l'échelle nationale, le défi sera d'effectuer la transition vers un réseau électrique à faibles émissions dans les provinces qui ont encore recours aux sources grandes génératrices d'émissions et d'intensifier la production à faibles émissions dans toutes les provinces pour satisfaire la demande croissante. Cette section examine les sources et technologies énergétiques pouvant être employées pour bâtir des réseaux électriques à faibles émissions, en se concentrant sur les gains d'efficacité, les technologies de CSC et les sources d'énergie à faibles émissions de substitution. Elle explore également les facteurs et les défis systémiques liés à la pénétration accrue des procédés de production d'électricité à faibles émissions dans les réseaux existants.

### 3.1.1 Amélioration de l'efficacité des réseaux électriques

Des changements dans les technologies utilisées dans la production, le transport et la distribution de l'électricité peuvent atténuer les pertes d'énergie et les émissions de dioxyde de carbone<sup>10</sup>.

Les nouvelles centrales électriques à combustible fossile possèdent une meilleure efficacité de conversion que les centrales conventionnelles. L'efficacité d'une centrale classique à charbon pulvérisé sous-critique est d'environ 38 % (c.-à-d.

---

9 Ce calcul repose sur la totalité de la population provinciale, Nouvelle-Écosse, Nouveau-Brunswick, Saskatchewan et Alberta exclus. Selon le comité d'experts, l'inclusion de l'Ontario comme province à faibles émissions est justifiée par la fermeture des centrales au charbon de la province et l'interdiction de ce type de centrales à l'avenir.

10 Les gains d'efficacité découlant de la réduction de la demande finale d'électricité et de l'adoption de technologies de cogénération sont étudiés aux sections 3.3 et 3.4.

62 % de l'énergie fournie par le charbon est perdue durant la combustion sous forme de chaleur résiduelle) (Larson *et al.*, 2012). Les centrales au charbon évoluées se servent de vapeur à pression et à température plus élevées pour parvenir à une plus grande efficacité. Les centrales supercritiques et ultra supercritiques, par exemple, peuvent atteindre une efficacité de 40 à 42 % et de 42 à 45 %, respectivement (Larson *et al.*, 2012). Le charbon peut aussi être gazéifié et brûlé dans une centrale à cycle combiné à gazéification intégrée (IGCC), ce qui permet d'obtenir une efficacité de 38 à 41 % (Larson *et al.*, 2012). Si l'efficacité tend à baisser pendant la durée de vie d'une centrale, un certain nombre d'améliorations peuvent être apportées aux centrales à charbon pulvérisé pour accroître leur rendement à mesure qu'elles vieillissent (Campbell, 2013). Pour les centrales au gaz, les turbines à cycle combiné sont nettement plus efficaces que les simples turbines à gaz. Les centrales à cycle combiné, qui greffent un cycle de production de vapeur par récupération de chaleur à la turbine à gaz, peuvent atteindre une efficacité de 55 % (Larson *et al.*, 2012).

Améliorer les technologies de transport et de distribution peut aussi réduire les pertes au sein du réseau électrique. Dans les pays de l'OCDE, environ 6,5 % de l'électricité produite est perdue durant le transport et la distribution combinés (AIE, 2003a; Bruckner *et al.*, 2014). Il est toutefois possible de réduire ces pertes grâce, notamment, à des transformateurs à haute efficacité et à des lignes de transport à courant continu à haute tension. Dans le futur, pourrait s'y ajouter l'emploi à grande échelle des superconducteurs dans les transformateurs et les lignes de transport (IEC, 2007; Bruckner *et al.*, 2014). La configuration du réseau peut aussi avoir une incidence sur l'efficacité. La transmission de l'électricité de la centrale au consommateur provoque des pertes de congestion. Réduire la distance qu'elle parcourt entre le point de production et le point de consommation peut améliorer l'efficacité, et la production décentralisée pourrait faciliter les réductions. Par contre, l'intégration de la production électrique à partir de sources éloignées des agglomérations peut accroître les pertes, ce qui constitue un problème dans le cas de la production utilisant des énergies renouvelables quand les sites optimaux sont éloignés de la demande.

Toutefois, la possible réduction globale des émissions grâce aux gains d'efficacité dans les réseaux de production, de transport et de distribution d'électricité est relativement modeste. L'accroissement de l'efficacité des centrales à combustible fossile entraîne des réductions des émissions approximativement proportionnelles (c.-à-d. un gain d'efficacité de 2 % se traduit par une réduction

d'environ 2 %) (Linn *et al.*, 2013)<sup>11</sup>. L'amélioration de l'efficacité des centrales au charbon évoluées est aussi, généralement, peu utile pour le Canada en raison de la réglementation fédérale qui empêche dans les faits la construction de nouvelles centrales sans dispositif de CSC<sup>12</sup>. Les possibles réductions des émissions découlant de l'amélioration de l'efficacité des réseaux sont elles aussi maigres et limitées aux provinces qui utilisent aujourd'hui des combustibles fossiles pour produire leur électricité. Si l'amélioration de l'efficacité des centrales au charbon et au gaz naturel et la modernisation des réseaux de transport et de distribution pouvaient entraîner la réduction progressive des émissions dues à la production d'électricité au Canada, il est peu probable que cette baisse soit suffisante pour compenser la hausse de la demande en électricité et la croissance continue des émissions.

### 3.1.2 Captage et stockage du carbone dans les réseaux électriques

Le captage et stockage du carbone est souvent perçu comme un procédé relativement mature, car tous les éléments utilisés le sont depuis des décennies — principalement dans la transformation du gaz et la récupération assistée du pétrole, où le dioxyde de carbone est injecté dans des puits existants pour accroître le volume de pétrole extrait (Bruckner *et al.*, 2014). Un système de CSC complet comprend quatre étapes :

- Le captage et la compression du dioxyde de carbone à partir d'une grande source fixe;
- Le transport du dioxyde de carbone vers un site où il sera stocké géologiquement à long terme;
- L'injection de dioxyde de carbone comprimé dans une formation géologique souterraine en profondeur;
- L'utilisation de moyens de mesure, de surveillance et de vérification pour s'assurer de la sécurité et de la permanence du stockage (Bruckner *et al.*, 2014).

Pour chacune de ces quatre étapes, il existe des systèmes qui ont été testés et déployés dans diverses situations. Si aucune province et aucun territoire n'a encore largement adopté le CSC pour l'atténuation des émissions, sa première application commerciale au monde dans une centrale au charbon a commencé en Saskatchewan à l'automne 2014 (voir l'encadré 3.1). Le CSC est aussi étudié au Canada comme outil de réduction des émissions produites par la valorisation du bitume des sables bitumineux (voir l'encadré 3.5).

11 Cette équivalence peut légèrement varier en raison des différences du contenu en carbone des divers types de charbon, ainsi que des caractéristiques des centrales, comme la taille, l'âge, le procédé de combustion et le taux d'utilisation (Linn *et al.*, 2013).

12 La réglementation fédérale adoptée en 2012 exige que les centrales au charbon répondent aux normes d'émissions des centrales au gaz naturel avant la fin de leur durée de vie utile. Sauf si un dispositif de CSC y est installé en rattrapage, la plupart des centrales au charbon canadiennes seront déclassées d'ici à 2030 et les deux récentes centrales supercritiques, d'ici à 2057 (Gouvernement du Canada, 2012).

### Encadré 3.1

#### Le projet de captage du carbone de Boundary Dam

En 2014, une installation de CSC intégrée à la centrale de Boundary Dam, en Saskatchewan, est devenue la première utilisation commerciale opérationnelle au monde du CSC dans une centrale au charbon. Grâce à l'équipement en rattrapage du procédé de captage du carbone postcombustion de l'une de ses unités de production, la centrale possède à présent la capacité de produire 110 mégawatts (MW) d'électricité à faibles émissions tout en captant environ 1 million de tonnes de dioxyde de carbone par an. Le CO<sub>2</sub> est extrait du gaz de combustion au moyen d'un solvant à base d'amine, puis comprimé et acheminé par pipeline à des champs pétrolifères dans le sud de la Saskatchewan, où il servira à la récupération assistée du pétrole ou sera stocké dans le sol à 3,4 kilomètres de profondeur, dans un aquifère salin. Le rattrapage a pris environ quatre ans et l'opération a coûté au total 1,3 milliard de dollars, dont 800 millions pour l'installation du dispositif de CSC, bien que SaskPower pense que les coûts d'immobilisations pourraient être réduits de 20 à 30 % sur la prochaine unité. Le projet de Boundary Dam tire profit de l'expérience de la province en matière de CSC acquise avec le projet de stockage et de surveillance de carbone de Weyburn-Midale. Entre 2000 et 2012, quelque 22 millions de tonnes de dioxyde de carbone issues d'une centrale de gazéification du charbon du Dakota du Nord ont été stockées et surveillées de façon permanente dans deux réservoirs de pétrole épuisés, dans le sud-est de la Saskatchewan. Boundary Dam et Weyburn-Midale prouvent la faisabilité à grande échelle du CSC à l'aide des technologies actuelles, et les futures utilisations du CSC dans des centrales au charbon au Canada et ailleurs dans le monde bénéficieront probablement des leçons tirées de ces projets.

SaskPower (2014b, 2014a); MITeI (2015)

Le CSC a parfois soulevé des inquiétudes à propos de la libération accidentelle du dioxyde de carbone stocké et de sa répercussion sur le climat. Des études ont calculé, par exemple, que les fuites de dioxyde des installations de CSC devraient être de moins de 1 % par 1 000 ans pour qu'on puisse parler de futur à faibles émissions, car même une faible fuite peut produire des rejets cumulatifs de grande envergure sur une longue période (Shaffer, 2010). Cependant, des évaluations portent à croire que le risque de fuite importante est mineur et décroît une fois que l'injection a cessé (GIEC, 2005; Benson *et al.*, 2012; Bruckner *et al.*, 2014). Dans sa revue des données probantes sur la stabilité géologique à long terme du CSC, Benson (2012) conclut que « [...] des réservoirs géologiques adéquatement choisis et entretenus ont de très fortes probabilités de conserver la presque totalité du CO<sub>2</sub> injecté pendant

très longtemps, plus longtemps qu'il est nécessaire pour récolter les bénéfices que le CSC est censé offrir » [traduction libre]. Le risque de fuite peut aussi être atténué par la surveillance à long terme des installations de stockage, et l'équipement destiné à cette fin a été testé dans des installations de séquestration existantes, notamment en Saskatchewan (Benson *et al.*, 2012).

Le CSC pourrait jouer un grand rôle dans la réduction des émissions de dioxyde de carbone produites par les réseaux électriques dans le monde et notamment au Canada. L'intégration des technologies de CSC actuelles aux centrales électriques pourrait réduire les émissions directes d'environ 85 à 90 %, selon la technologie employée (Schlömer *et al.*, 2014). Les évaluations menées à l'échelle mondiale révèlent que le CSC pourrait être l'un des principaux instruments de la réduction des émissions requise pour stabiliser le climat au cours de ce siècle, et donner des résultats similaires à ceux de l'efficacité énergétique et de la substitution interénergétique (GIEC, 2005; Benson *et al.*, 2012)<sup>13</sup>. Dans son évaluation du potentiel de réduction des émissions de 65 % au Canada d'ici à 2050, une étude menée pour la Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie (TRNEE) a révélé que le CSC constituait le principal moyen unique de réduire les émissions et la source de la majeure partie des réductions prévues pour la production d'électricité (J&C Nyboer and Associates Inc., 2008; TRNEE, 2009). Un inventaire du potentiel de séquestration du carbone en Amérique du Nord a estimé la capacité de stockage géologique du carbone dans l'ensemble des provinces et territoires canadiens à 132 gigatonnes, soit assez pour 600 ans d'émissions canadiennes au niveau actuel — bien que l'emplacement et l'accessibilité des sites varient d'une région à l'autre (ANASC, 2012).

Cependant, le déploiement à grande échelle du CSC se heurte à d'importants obstacles. L'intégration de ce procédé dans les centrales électriques entraîne un surcoût notable par rapport aux centrales au charbon et au gaz naturel classiques (voir la section 3.1.3), principalement en raison de l'augmentation des coûts d'immobilisations et aux besoins énergétiques accrus susceptibles de réduire le volume de production d'électricité de 15 à 30 % (Benson *et al.*, 2012). Le CSC est plus économique dans les nouvelles centrales électriques et son installation en rattrapage sur les centrales en service peut ne pas être techniquement et économiquement viable selon, par exemple, l'âge et la taille

---

13 Il est aussi possible de produire de l'électricité à émissions de carbone *négligables* par l'association de la biomasse et du CSC. La biomasse absorbe le carbone atmosphérique, qui est ensuite capté pendant la combustion et stocké de manière géologique. Les modèles mondiaux d'évaluation intégrée laissent penser que cette bioénergie alliée au CSC pourrait jouer un rôle crucial dans la limitation future du réchauffement à 2 °C ou moins en permettant la réduction graduelle des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (GIEC, 2014b).

de la centrale, l'actuel procédé de traitement des gaz de combustion, l'espace disponible pour l'équipement ou l'accès aux solutions de stockage et de transport du carbone (AIE, 2012b). La pénétration et le déploiement à grande échelle du CSC nécessiteraient la construction d'une infrastructure appropriée, par exemple des pipelines et autres systèmes de distribution et des sites d'injection. Des obstacles réglementaires et juridiques au stockage peuvent aussi se dresser (Herzog, 2010). Enfin, l'acceptation publique du CSC peut constituer un frein dans certains cas, en raison des craintes concernant les risques pour la sécurité perçus et les impacts environnementaux potentiels (voir la section 3.1.4). Pour ces raisons, il est peu probable que le CSC soit déployé à grande échelle au Canada (ou ailleurs) sans politiques d'atténuation des émissions relativement strictes ou d'autres types d'appuis gouvernementaux.

### 3.1.3 La substitution interénergétique dans les réseaux électriques

La substitution interénergétique sera essentielle pour l'élimination des émissions de dioxyde de carbone des réseaux électriques à long terme. Remplacer les centrales électriques au charbon et au gaz naturel par des procédés à faibles émissions pourrait permettre de supprimer la majeure partie des émissions restantes de la production d'électricité au Canada, tout en satisfaisant la croissance de la demande d'électricité (Bataille *et al.*, 2014).

Il existe toute une gamme de sources et de technologies énergétiques permettant la production d'électricité. Le charbon et le gaz naturel sont une source d'énergie dominante dans de nombreux territoires et provinces. Le pétrole est aussi occasionnellement employé comme combustible à cet effet — dans les turbines à pétrole et dans les génératrices diesel, couramment employées dans les communautés qui ne sont pas raccordées au réseau. Parmi les solutions commerciales de production à faibles émissions, on peut citer les installations hydroélectriques (à partir d'un réservoir ou au fil de l'eau), nucléaires, à la biomasse, éoliennes à terre et en mer et solaires photovoltaïques et concentrées. À cela s'ajoutent les centrales marémotrices (et autres procédés de production utilisant les océans), qui exploitent le mouvement des marées et des courants marins pour actionner des turbines. À l'exception de certains genres de centrales marémotrices, toutes les options de production à faibles émissions mentionnées ici ont été largement déployées et intégrées aux réseaux électriques existants ces dernières années.

Chaque solution de production d'électricité donne lieu à des répercussions sociales et environnementales particulières. Ces répercussions se manifestent en divers points de la chaîne d'approvisionnement en énergie : extraction et transformation de la ressource; construction de l'infrastructure; production, transport et distribution de l'électricité, et pendant la conception et la gestion

du réseau. Leur nature et leur ampleur varient grandement selon la situation locale et les paramètres propres au site ou au projet. Par conséquent, le choix des procédés de production électrique de substitution dépend du contexte. Il n'y a pas de solution préférable dans tous les cas et ce n'est pas le rôle du comité d'experts de prescrire une méthode en particulier pour une province ou un territoire. Toutefois, les avantages en matière d'atténuation des émissions procurés par les procédés de substitution doivent être pesés par rapport aux hausses de coûts de production électrique et aux conséquences sur la flexibilité et la résilience du réseau. Nombre des entraves à l'expansion de la production d'électricité découlent des difficultés d'intégration de la nouvelle capacité de production dans les réseaux de transport et de distribution.

Les émissions de dioxyde de carbone sont directement fonction de la teneur en carbone du combustible utilisé pour produire l'électricité. Le tableau 3.1 présente les émissions moyennes de gaz à effet de serre par kilowattheure d'électricité pour certaines sources et technologies énergétiques à combustible fossile. Le charbon est le combustible qui rejette le plus d'émissions. Le gaz naturel en produit à peu près deux fois moins, les centrales au gaz naturel à cycle combiné modernes émettant approximativement 50 % du volume de dioxyde de carbone par kilowattheure d'électricité produite rejeté par une centrale au charbon pulvérisé. Les centrales au gaz naturel peuvent donc assumer un rôle de source d'énergie de transition dans le passage à un réseau électrique à faibles émissions et intervenir en complément lors de la fourniture d'électricité à suivi de charge et de pointe aux réseaux ayant fortement recours aux énergies renouvelables intermittentes. Les sources d'énergie électrique sans carbone (p. ex. hydroélectricité, nucléaire, géothermie, éolien, solaire et énergie marémotrice) ne produisent aucune émission directe de gaz à effet de serre. Les centrales électriques fonctionnant exclusivement à la biomasse sont généralement considérées comme ayant des émissions de gaz à effet de serre directes nettes nulles, car on présume que les émissions découlant de la combustion des combustibles sont compensées par le dioxyde de carbone atmosphérique précédemment absorbé (Smith *et al.*, 2014b). Les centrales électriques mixtes fonctionnant avec une combinaison de biomasse et de charbon peuvent produire des émissions équivalentes à celles des centrales au gaz naturel et sont aujourd'hui extrêmement répandues en Europe (Al-Mansour et Zuwala, 2010).

Tableau 3.1

**Émissions directes de gaz à effet de serre pour certains procédés de production d'électricité (g  $\text{eqCO}_2/\text{kWh}$ )**

	Médiane	Min–Max
Charbon pulvérisé	760	670–870
Cycle combiné au gaz naturel	370	350–490
Charbon pulvérisé avec CSC	120	95–140
Cycle combiné au gaz naturel avec CSC	57	30–98
Nucléaire, hydraulique, éolien, solaire, biomasse et marémotrice	0	

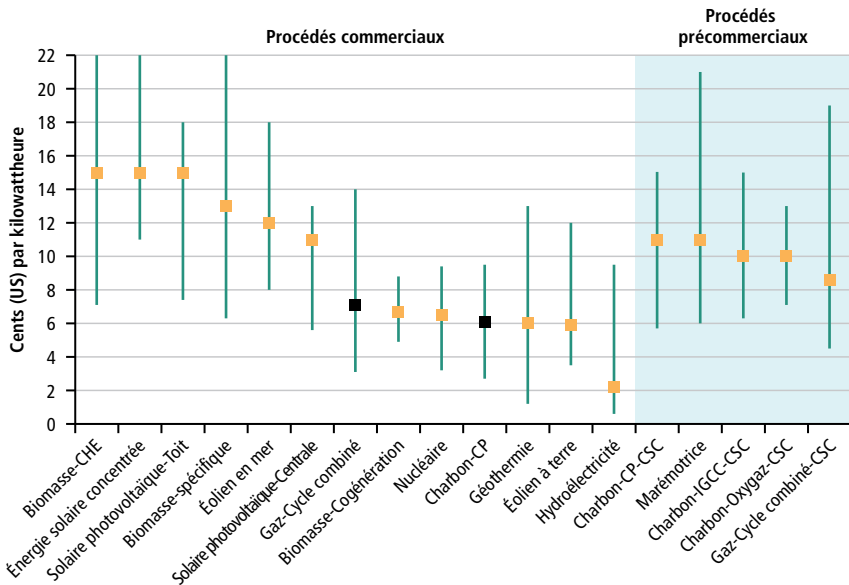
Source des données : Schlömer et al. (2014)

Le tableau présente l'estimation des émissions directes de gaz à effet de serre pour certains procédés.

Des études ont également évalué les émissions indirectes de gaz à effet de serre, ou pendant leur vie utile, des méthodes de production d'électricité, notamment les émissions rejetées par la chaîne d'approvisionnement et durant la construction des installations, et les répercussions sur la biomasse du changement d'affectation des terres. Toutefois, l'analyse de ces types d'émissions est délicate du point de vue méthodologique et soumise à de grandes incertitudes. Les estimations sont également intrinsèquement problématiques pour la modélisation de l'énergie, car elles combinent l'analyse statique (des émissions indirectes de l'actuel système dominé par les combustibles fossiles) et l'analyse dynamique (des émissions indirectes avec la pénétration graduelle des nouveaux procédés dans tous les secteurs à émissions presque nulles).

L'indicateur standard utilisé pour comparer les coûts des méthodes de production électrique est le *coût moyen actualisé de l'énergie* (CMAE). Le CMAE est une estimation du coût de l'électricité produite par une nouvelle centrale durant sa durée de vie prévue; il tient compte des coûts d'immobilisations, d'exploitation et de maintenance, de financement, de combustible et de déclassement. La figure 3.1 présente l'estimation du CMAE médian et de la plage de CMAE pour diverses sources d'énergie. Ces valeurs ne sont fournies qu'à titre indicatif et sont fondées sur les moyennes mondiales tirées des publications. Elles peuvent ne pas refléter exactement les coûts en Amérique du Nord et ne tiennent pas compte des coûts engendrés par les politiques d'atténuation des émissions.

Les estimations du CMAE permettent une comparaison générale des coûts de la production d'électricité pour différentes techniques, mais elles comportent plusieurs limites. Premièrement, elles ne prennent pas en considération la variation du prix courant de l'électricité découlant de la variation de la demande et surestiment donc la valeur des méthodes faisant appel à des énergies



Source de données : Schlömer et al., 2014

Figure 3.1

### Estimation du coût moyen actualisé de l'énergie pour l'électricité de certains procédés

Le CMAE évalue le coût de l'électricité produite par une nouvelle centrale durant sa vie utile prévue et tient compte des coûts d'immobilisations, de fonctionnement et d'entretien, de financement, de combustible et de déclassement. Les données présentées sont tirées de l'examen des publications internationales et correspondent aux moyennes mondiales (GIEC, 2014b). Elles correspondent aussi à un coût d'immobilisations moyen pondéré de 5 % et aux heures de pleine charge (c.-à-d. production de base). Le coût de certaines options (p. ex. nucléaire, hydroélectricité, solaire) peut ne pas être exact pour l'Amérique du Nord en raison de la variation des coûts de réglementation, d'immobilisations et de construction et de la disponibilité de la ressource. Les lignes représentent la plage entre les estimations minimum et maximum pour chaque procédé et les carrés, l'estimation médiane. Les estimations maximums pour la biomasse-CHE et la biomasse-spécifique ne sont pas illustrées. Les estimations du CMAE pour les sources d'énergies fossiles (sans CSC) sont représentées en noir. *Biomasse-CHE* signifie « biomasse et production combinée de chaleur et d'électricité ». *Charbon-CP* signifie « charbon pulvérisé ». *IGCC* signifie « gazéification du charbon intégrée à un cycle combiné ».

renouvelables intermittentes, comme l'énergie éolienne et l'énergie solaire, par rapport aux centrales à production acheminable (c'est-à-dire, celles qui peuvent être rapidement mises en fonction ou hors fonction et donc, fournir de l'électricité durant les périodes de pointe). Cette limite signifie également que les calculs de CMAE surestiment la valeur de l'énergie éolienne par rapport à l'énergie solaire, qui est la plus susceptible d'être produite durant la journée, quand la demande est élevée (Joskow, 2011). Une comparaison plus précise des

coûts tient compte des fluctuations du prix courant de l'électricité produite ou inclut les coûts de stockage de l'électricité non acheminable. Deuxièmement, les estimations du CMAE ne se soucient pas des coûts d'intégration au réseau, notamment des coûts de l'infrastructure de transport ou de distribution, ou des coûts additionnels entraînés par l'équilibrage entre l'offre et la demande dans le réseau (Bruckner *et al.*, 2014). Troisièmement, on néglige les externalités (coûts pour la société non inclus dans le prix courant) des sources d'énergie à base de combustibles fossiles traditionnelles, comme les coûts pour la santé résultants de la pollution de l'air ou les coûts des changements climatiques. La correction pour les externalités au moyen de politiques de tarification des émissions et autres mesures rend les procédés de production électrique renouvelable plus concurrentiels par rapport aux combustibles fossiles sur le plan des coûts (NRC, 2010; FMI, 2014).

Les coûts de production d'électricité, quelle que soit la méthode, varient considérablement selon les paramètres propres au projet et la situation régionale. La solution la moins coûteuse n'est donc pas la même dans tous les cas. L'hydroélectricité à grande échelle, les projets géothermiques de grande envergure, l'éolien à terre et certaines applications photovoltaïques hors réseau peuvent être aussi économiques que les solutions à combustible fossile, dans des conditions favorables. Cependant, la plupart des options de production à faibles émissions demeurent plus chères que les procédés à combustible fossile, surtout quand on inclut les coûts de stockage des modes de production non acheminable (Schlömer *et al.*, 2014).

Le CSC augmente encore le coût de production de l'électricité, bien que le prix de ce procédé soit comparable à celui des autres méthodes à faibles émissions selon le contexte. Pour les centrales au charbon pulvérisé, intégrer le CSC à une nouvelle installation se traduit par une hausse des coûts d'environ 80 % (de 6,1 ¢/kWh à 11,0 ¢/kWh). Pour les centrales à cycle combiné alimentées au gaz naturel, l'augmentation des coûts estimée est de 21 % (de 7,1 ¢/kWh à 8,6 ¢/kWh). Toutefois, ces chiffres pourraient graduellement baisser, avec les progrès technologiques continus, particulièrement en ce qui concerne les technologies de captage du carbone. Les coûts du CSC dépendent également de la distribution et du stockage du dioxyde de carbone; cependant, ces opérations ne représentent qu'une partie relativement faible du coût total du procédé<sup>14</sup>.

---

14 Les estimations du CMAE exposées ici présument des coûts de distribution et de stockage de 10 \$US/tonne de CO<sub>2</sub>. La plupart des études laissent penser qu'il est peu probable que les coûts de transport et de stockage reliés au déploiement du CSC dépassent 15 \$US/tonne CO<sub>2</sub> (Bruckner *et al.*, 2014).

L'attribution des coûts varie selon le type de dépense et la durée de vie de la centrale, ce qui peut nuire aux perspectives commerciales de divers concepts de centrale. Les méthodes telles que le nucléaire, la géothermie et l'hydroélectricité à grande échelle ont des coûts d'investissement initiaux élevés et des coûts d'exploitation comparativement bas (Bruckner *et al.*, 2014; Schlömer *et al.*, 2014). Ces solutions peuvent donc faire face à des défis de financement plus aigus. Inversement, des dispositifs comme les systèmes d'énergie solaire concentrée et les turbines éoliennes au large ont tendance à avoir des coûts d'exploitation et de maintenance plus élevés que les coûts d'immobilisations initiaux. Les coûts de combustible des centrales électriques sont eux aussi variables. À l'exception de la biomasse, les énergies renouvelables ne coûtent rien en combustible. En ce qui concerne l'énergie nucléaire, ces coûts représentent une proportion relativement faible des coûts totaux. Les coûts de combustible des centrales au gaz naturel sont plus importants, bien que le prix du gaz naturel en Amérique du Nord a baissé, ce qui, allié à la récente hausse de la production, a contribué à l'abandon graduel des centrales au charbon.

Ces coûts ne sont pas non plus statiques. Les coûts de certaines solutions de production d'électricité changent rapidement en réaction au développement technologique et au changement des conditions du marché. Par exemple, le coût des systèmes photovoltaïque au silicium cristallin a chuté de 57 % entre 2009 et 2013 (Bruckner *et al.*, 2014). Le CMAE des systèmes éoliens à terre, au gaz d'enfouissement, aux déchets solides municipaux et de gazéification de la biomasse a lui aussi baissé de 15 à 26 % durant cette période (Bruckner *et al.*, 2014). Les futures tendances prévues varient selon la maturité technologique de la solution. Les progrès des systèmes solaires et éoliens devraient entraîner des réductions constantes des coûts. En comparaison, l'hydroélectricité est une méthode relativement mature, et ses coûts ne devraient pas grandement changer, bien qu'on dispose de relativement peu d'information sur la façon dont les coûts de l'hydroélectricité ont évolué avec le temps (Kumar *et al.*, 2011). Les avancées technologiques supplémentaires continueront probablement à faire baisser les coûts des solutions de production à faibles émissions (dont le CSC). Cependant, ces tendances coïncident également avec le déclin des prix des combustibles fossiles en raison des progrès technologiques (comme les nouvelles techniques d'extraction du pétrole et du gaz non conventionnels) et la réduction de la demande provoquée par les politiques climatiques (Sinn, 2008).

Au Canada, il est probable que la transition vers des sources d'électricité à faibles émissions entraînera une hausse des coûts pour les consommateurs, quoique cette hausse s'étalera probablement sur plusieurs décennies, à mesure du déclassement et du remplacement des centrales électriques. Le gaz naturel se présente de plus en plus comme le combustible par défaut pour les nouvelles

installations de production en Amérique du Nord. Le coût actualisé des solutions à faibles émissions peut être considérablement inférieur à celui d'une centrale à cycle combiné au gaz naturel, dans le cas de l'hydroélectricité et de l'éolien à terre, ou être de 50 à 70 % supérieur, dans le cas du photovoltaïque solaire commercial et de l'éolien en mer. Les Canadiens ont la possibilité de verser volontairement à une entreprise privée une prime de 2,5 cents par kilowattheure pour qu'une quantité d'électricité à faibles émissions équivalente à ce qu'ils consomment soit injectée dans le réseau, bien que cette prime ne se traduise pas nécessairement par la hausse des coûts des réseaux de transport et de distribution et par un recours accru aux sources d'énergie intermittentes<sup>15</sup>. Étant donné le prix relativement bas de l'électricité au Canada dans la plupart des provinces et territoires, la hausse du coût de l'électricité produite à partir de sources énergétiques à faibles émissions ne devrait pas constituer une charge majeure pour la plupart des consommateurs et des entreprises.

### 3.1.4 Considérations systémiques relatives à l'électricité

Les réseaux électriques sont vastes, complexes et nécessitent de nombreuses immobilisations. Si des changements dans les technologies et les sources énergétiques à l'échelle de la centrale électrique peuvent permettre de réduire les émissions, ces réductions peuvent être entravées ou favorisées par des facteurs touchant la façon dont ces réseaux sont gérés. Le comité d'experts a déterminé trois considérations systémiques clés pour la réduction des émissions des réseaux électriques :

- Répondre aux inquiétudes de la population au sujet des impacts environnementaux localisés découlant de l'accroissement de la capacité de production;
- Gérer l'équilibrage de charge et surmonter les défis posés par l'intégration de nouvelles sources de production;
- Améliorer les réseaux de transport et de distribution électriques pour permettre un recours plus efficace aux sources à faibles émissions.

### Impacts environnementaux localisés et inquiétudes de la population

Les procédés de production à faibles émissions sont essentiels à l'atténuation des changements climatiques et sont donc bénéfiques à l'échelle planétaire. Toutefois, ils peuvent aussi avoir des effets négatifs locaux sur l'environnement et sur les collectivités avoisinantes, notamment l'intrusion visuelle dans le paysage; le bruit, la dégradation de la terre et de l'eau; la perturbation des écosystèmes; et l'introduction de nouvelles sources de pollution de l'air, de l'eau et de la terre (Walker, 1995). La nature des impacts locaux des méthodes de production

---

15 D'après les tarifs de 2015 fournis par Bullfrog Power. Voir <https://www.bullfrogpower.com/index.cfm>.

électrique varie selon la méthode et le combustible. Le tableau 3.2 dresse une liste d'impacts environnementaux et d'autres sujets d'inquiétude pour la population relatifs à certains modes de production.

Parmi les énergies renouvelables, les problèmes sont plus aigus pour l'hydroélectricité, les turbines éoliennes et la biomasse. Les projets hydroélectriques perturbent les écosystèmes aquatiques et terrestres touchés parce qu'ils entravent la migration du poisson, modifient les modèles de transport sédimentaire et nuisent au transport des nutriments vers les zones en aval (Kumar *et al.*, 2011). Ces impacts ont incité la population à s'opposer à de nouvelles grandes installations hydroélectriques (particulièrement à celles dotées de réservoirs) ces dernières décennies (Jaccard, 2006a; PTAE, 2013). L'aménagement de turbines éoliennes perturbe le sol, cause des impacts écologiques localisés et a des effets sur l'affectation des terres; la mortalité des oiseaux et des chauves-souris qu'il provoque soulève est un sujet particulier de préoccupation (NRC, 2007)<sup>16</sup>. Leur incidence esthétique sur le paysage est une autre raison de l'opposition publique, tout comme la crainte que le bruit des turbines puisse être dommageable pour la santé (NRC, 2007; CAC, 2015a)<sup>17</sup>. L'intensification de la production agricole pour fournir de l'énergie à partir de la biomasse peut exacerber les inquiétudes concernant la pollution par les engrais et les pesticides, dégrader la qualité du sol et avoir des répercussions négatives sur les écosystèmes et les espèces à proximité (Chum *et al.*, 2011). La production de biomasse peut accroître la consommation d'eau dans certaines régions et intensifier le stress hydrique. Mais les préoccupations publiques les plus grandes concernent l'utilisation des cultures vivrières pour produire du carburant, ce qui pourrait augmenter les prix des aliments et aggraver l'insécurité alimentaire et financière des populations vulnérables (Smil, 2010).

---

16 Les taux de mortalité devraient être comparés au nombre de décès d'oiseaux dus à l'activité humaine (par exemple, à cause d'accidents routiers ou de la possession d'animaux de compagnie) et aux structures humaines (édifices vitrés), dont l'ampleur est supérieure (Wiser *et al.*, 2011).

17 Aucune certitude n'existe en ce qui concerne la relation causale entre le bruit des turbines éoliennes et les impacts négatifs sur la santé; cependant, les turbines produisent des sons sur plusieurs fréquences, ce qui peut déranger et constituer une source de stress (CAC, 2015a).

Tableau 3.2

**Impacts environnementaux et sources de préoccupations publiques pour certains procédés de production d'électricité à faibles émissions**

Procédé	Impacts environnementaux locaux et sources de préoccupations publiques
<b>Hydroélectricité</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impact sur les systèmes hydrologiques (p. ex. débits et niveaux d'eau, transport des sédiments et des nutriments, température de l'eau).</li> <li>• Impact sur les espèces et les écosystèmes aquatiques et terrestres touchés (p. ex. à cause de la perturbation de l'habitat ou des obstacles à la migration du poisson).</li> <li>• Possibilité de déplacement de personnes ou de communautés.</li> <li>• Conflits sur le partage des bénéfices et des coûts dans les communautés touchées.</li> </ul>
<b>Éolien</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impact sur les espèces locales et migratoires (p. ex. oiseaux et chauves-souris).</li> <li>• Effet visuel sur le paysage.</li> <li>• Bruit des turbines éoliennes et inquiétudes au sujet de ses impacts sur la santé.</li> </ul>
<b>Nucléaire</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risque d'accident majeur.</li> <li>• Gestion et stockage des déchets.</li> <li>• Risques de prolifération.</li> <li>• Utilisation de l'eau dans les centrales.</li> </ul>
<b>Biomasse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pollution de l'air due à la combustion.</li> <li>• Impact environnemental de l'intensification et du développement de la production agricole (p. ex. dégradation du sol, usage de pesticides, usage d'engrais ou ruissellement d'azote).</li> <li>• Impact sur la biodiversité locale de la production agricole.</li> <li>• Hausse de la consommation d'eau.</li> <li>• Impact sur le prix des aliments causé par l'utilisation de cultures vivrières pour produire du carburant.</li> </ul>
<b>Solaire concentré</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perturbation du sol provoquée par la construction.</li> </ul>
<b>Solaire photovoltaïque</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilisation de matières dangereuses dans la production.</li> </ul>
<b>Géothermie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impact de la perturbation du sol provoquée par la construction.</li> <li>• Risques de conflits au sujet de l'affectation des terres (p. ex. obstacles à l'exploitation à proximité des régions touristiques ou des parcs nationaux).</li> </ul>

L'énergie nucléaire éprouve de grandes difficultés à être acceptée par la population et à trouver de nouveaux lieux pour construire des centrales. Les craintes à son sujet sont dues, entre autres, aux défis et aux risques du stockage à long terme des déchets, aux risques d'accident nucléaire et aux possibilités de prolifération nucléaire et de militarisation des matières nucléaires. S'il existe diverses façons d'atténuer ces risques (par exemple, par l'amélioration de la conception des réacteurs, l'établissement de mesures de protection techniques appropriées ou l'aménagement d'installations sûres de stockage à long terme

des déchets nucléaires), ils demeurent un obstacle à l'acceptation à grande échelle. D'ailleurs, 53 % des Canadiens déclarent être fortement ou quelque peu opposés à l'exploitation de l'énergie nucléaire. Par comparaison, seuls 37 % d'entre eux y sont favorables. Et les accidents nucléaires renforcent les craintes (Kim *et al.*, 2013). L'appui de la population canadienne à la construction de nouveaux réacteurs et à la modernisation ou à la remise en état des réacteurs existants a fondu après la catastrophe de Fukushima en 2011 (ANC, 2010, 2011; cité par EEUC, 2015). La perception que la population a du risque ne correspond cependant pas nécessairement à l'historique de sécurité des procédés de production électrique de substitution. Les taux de décès à la suite d'accidents dans les centrales nucléaires des pays de l'OCDE sont relativement faibles par rapport à ce qu'ils sont dans les centrales au charbon, au pétrole et hydroélectriques, qui ont connu bien plus de morts par kilowattheure d'électricité produit (Sathaye *et al.*, 2011; Bruckner *et al.*, 2014).

Les craintes exprimées par la population à propos des méthodes de production d'électricité se manifestent parfois seulement quand l'exploitation se déroule au voisinage immédiat d'une communauté, et se traduisent par une résistance localisée. L'énergie éolienne, par exemple, bénéficie d'un large soutien populaire si l'on en juge par les sondages, mais l'exploitation de turbines éoliennes se heurte souvent à l'opposition autour du site. Certaines recherches laissent aussi penser que l'opposition locale se manifeste principalement durant la planification, mais que l'acceptation et le soutien ont tendance à s'accroître une fois le projet achevé (Krohn et Damborg, 1999). L'expérience au Canada et dans d'autres pays porte à croire que la façon dont les communautés participent à la planification et à l'exploitation énergétiques peut influencer le degré auquel les préoccupations locales entravent ou empêchent la construction de centrales (Wiser *et al.*, 2011; CAC, 2015a).

Le CSC peut également avoir de la difficulté à gagner l'acceptation de la population dans certains cas, en raison de craintes localisées concernant les risques pour la sécurité posés par les fuites de dioxyde de carbone, le risque de contamination des eaux souterraines, les répercussions des levés sismiques et les impacts environnementaux de la construction des pipelines et des installations de stockage. À l'échelle mondiale, les études portent à croire que le CSC est mal connu et peu appuyé au sein de la population (Benson *et al.*, 2012). Cependant, l'attitude des Canadiens à l'égard de ce procédé ne laisse pas entrevoir une forte opposition. Une étude réalisée en 2009 a montré qu'ils soutenaient modérément le CSC comme stratégie d'atténuation des changements climatiques et le percevaient comme moins risqué que les installations conventionnelles d'exploitation des hydrocarbures et que les centrales nucléaires et au charbon classiques (Sharp *et al.*, 2009). Les inquiétudes concernant les impacts environnementaux des centrales électriques ne se limitent également pas aux options de production à faibles

émissions : la construction de nouvelles centrales à combustible fossile — et en particulier, de centrales au charbon — se heurte aussi fréquemment à l'objection de la population en raison de craintes pour l'environnement (voir l'encadré 3.2).

### **Encadré 3.2** **Impacts environnementaux locaux des centrales** **à combustible fossile**

Les centrales électriques à combustible fossile engendrent des impacts environnementaux négatifs à leur emplacement et au lieu d'extraction de la ressource. La pollution de l'air causée par la combustion du charbon pour produire de l'électricité nuit de façon importante à la santé des communautés touchées et leur occasionne des dépenses élevées (Markandya et Wilkinson, 2007; Smith *et al.*, 2012; Bruckner *et al.*, 2014). L'extraction du charbon et du gaz naturel provoque également la perturbation physique des sols touchés et peut avoir des effets néfastes sur les écosystèmes terrestres et aquatiques. D'énormes quantités d'eau sont nécessaires pour éliminer les impuretés du charbon durant la production et un drainage minier acide peut survenir quand de l'eau acide provenant de la mine s'écoule dans les cours d'eau. L'extraction du charbon peut introduire des substances toxiques, telles que les métaux lourds, dans l'environnement, notamment par l'intermédiaire des bassins de résidus (NRC, 2010). L'extraction du gaz naturel a des répercussions sur les sols et les écosystèmes, par le biais du forage des puits et de la construction des routes et des pipelines, et les impacts terrestres peuvent aussi accroître l'érosion et perturber les cours d'eau locaux (NRC, 2010). Les méthodes non conventionnelles d'extraction du gaz, comme la fracturation hydraulique, peuvent amplifier ces impacts en raison de la consommation accrue d'eau et de la plus grande densité de puits, ce qui augmente les risques de contamination de l'eau de surface et des eaux souterraines (CAC, 2014). Ces impacts ont déclenché l'opposition de la population à l'extraction houillère et gazière dans de nombreux pays et contribué à une forte résistance publique à l'exploitation du charbon au Canada. Un sondage révèle que 68 % des Canadiens sont opposés à la production d'électricité au moyen de centrales au charbon (ANC, 2012).

Face à ces impacts, les tentatives pour accroître rapidement la capacité de production à faibles émissions peuvent provoquer des conflits quant à l'affectation des terres et susciter l'opposition publique si les décideurs et les organismes de réglementation n'anticipent pas bien les préoccupations de la population et n'y répondent pas convenablement (Jaccard *et al.*, 2011). Il est donc nécessaire de

mettre en place des mécanismes institutionnels (p. ex. planification énergétique, aménagement du territoire et stratégies de consultation de la population et collaboration avec elle) qui répondent à ces inquiétudes aux différents paliers décisionnels. Étant donnée l'absolue nécessité de développer la capacité de production à faibles émissions pour atténuer les changements climatiques, les mécanismes classiques comme les évaluations environnementales peuvent ne pas permettre de répondre efficacement (ou rapidement) aux craintes. Des mécanismes de planification énergétique doivent aussi être élaborés pour équilibrer les impacts mondiaux et locaux dans la future planification de l'accroissement de la capacité. La section 4.4.3 examine de manière approfondie les méthodes que les gouvernements peuvent suivre pour surmonter ces défis.

### Équilibrage de charge et souplesse du réseau électrique

Les réseaux électriques doivent continuellement équilibrer l'offre en fonction des fluctuations de la demande. Pour cela, ils ont recours à des sources de production acheminables ou partiellement acheminables, qui peuvent être mises en service quand la demande augmente et mises hors service lorsqu'elle baisse. Tous les modes de production d'électricité ne conviennent pas à cet usage. Les énergies renouvelables, comme l'énergie éolienne ou l'énergie solaire, dépendent des conditions météorologiques (p. ex. vitesse du vent, couverture nuageuse ou rayonnement solaire) et ne sont que partiellement acheminables. La capacité offerte par ces sources peut être réduite au besoin, mais elle ne peut pas être accrue au-delà de ce que les conditions météorologiques permettent. Les sources de production thermique, telles que les centrales au charbon et les centrales nucléaires, peuvent servir de sources flexibles d'énergie, mais elles ne sont pas prévues à cet effet (MIT, 2011) — leur utilisation dans ce but réduit leur rentabilité et accroît leur usure<sup>18</sup>. Les centrales électriques dont le coût marginal (c.-à-d. le coût d'exploitation et de combustible) est le plus faible sont généralement employées pour fournir l'électricité de base; c'est-à-dire que ce sont elles qui produisent l'électricité la majeure partie du temps. Ce sont les centrales dont les coûts d'immobilisations sont les plus élevés (p. ex. centrales hydroélectriques, centrales nucléaires et grosses centrales au charbon) qui conviennent le mieux à cette fonction.

---

18 Ces centrales sont souvent prévues pour fonctionner la plupart du temps (c.-à-d. qu'elles se caractérisent par un facteur de charge élevé); elles doivent donc être utilisées de manière intensive pour être rentables. De plus, quand les centrales thermiques classiques sont mises en service ou hors service, elles subissent une usure physique supplémentaire; leur efficacité diminue donc à mesure que le temps passe (MIT, 2011).

La production d'électricité à partir de centrales hydroélectriques à réservoirs est acheminable et peut efficacement compléter la production intermittente à partir de sources telles que le vent (Acker, 2011), bien que comme pour les grosses centrales thermiques, il peut ne pas toujours être économique de réserver la capacité hydroélectrique hors ligne. À l'inverse, les centrales au gaz naturel sont fréquemment utilisées pour répondre aux fluctuations de la demande. En raison du besoin d'équilibrer la charge, intégrer davantage de quantité d'électricité intermittente et non acheminable dans les réseaux électriques peut également nécessiter l'ajout d'une capacité de production acheminable complémentaire.

Les systèmes de stockage d'énergie raccordés au réseau peuvent, eux aussi, aider à surmonter cette difficulté. L'aptitude à stocker l'électricité excédentaire en dehors des heures de pointe serait extrêmement précieuse pour les réseaux électriques qui recourent considérablement aux sources intermittentes. Parmi les dispositifs de stockage dans le réseau actuels et potentiels, on peut citer les systèmes à air comprimé, les batteries, les piles à hydrogène, les volants d'inertie et les condensateurs électrochimiques (DOE, 2013b). La plupart des systèmes de stockage d'électricité existants reposent sur des réservoirs ou sur le pompage-turbinage, procédé dans lequel l'énergie est stockée sous forme d'eau qui est pompée dans un bassin surélevé pour être ultérieurement libérée afin d'alimenter une turbine (DOE, 2013b). Les batteries des véhicules hybrides rechargeables (VHR) peuvent servir d'appareil de stockage à long terme, bien que cette méthode nécessite la modification du réseau de distribution. Les systèmes de stockage de l'énergie, et leurs défis économiques et techniques, varient en fonction du contexte, de l'ampleur du déploiement, de la quantité d'énergie stockée et de la durée du stockage (MIT, 2011; DOE, 2013b). Les batteries de grandes dimensions destinées au stockage d'électricité à l'intention des réseaux sont en général excessivement coûteuses. Cependant, l'adoption de divers dispositifs de stockage à l'échelle du réseau s'accélère à mesure que leur coût devient plus concurrentiel dans certains marchés et pour certaines applications (GTM Research et ESA, 2015). Comme les coûts de stockage de l'énergie continuent à baisser, ces appareils pourraient être déployés à plus grande échelle comme solutions viables pour surmonter les défis de certains réseaux.

Les capteurs, systèmes de commande et algorithmes de répartition avancés peuvent aussi aider à gérer les réseaux électriques comportant des combinaisons plus complexes et plus variables de sources de production (MIT, 2011). Les algorithmes de répartition, par exemple, ne sont pas conçus pour répondre aux « incertitudes propres à la prévision du vent, de la charge et autres probabilités » [traduction libre] (MIT, 2011). Il est aussi possible d'employer des stratégies

de gestion de la demande d'électricité pour donner de la souplesse au réseau (AIE, 2003b; Depuru *et al.*, 2011; Cook *et al.*, 2012; Joung et Kim, 2013; Procter, 2013). Au lieu d'accroître la capacité de production pour satisfaire la demande de pointe, les fournisseurs d'électricité peuvent prendre des mesures pour réduire la demande ou pour la transférer en dehors des heures de pointe. Les programmes classiques de gestion de la demande associés à une tarification en fonction du moment de la journée et à des dispositifs comme les compteurs intelligents peuvent atténuer les fluctuations de la demande et faciliter en partie la gestion de la charge.

Les difficultés d'équilibrage de la charge découlant de la plus grande intégration de la production provenant de sources intermittentes nécessitent une planification intégrée des systèmes énergétiques reposant sur la constitution d'une combinaison souple de sources d'électricité et sur un plus grand accès aux marchés grâce aux interconnexions. Dans le contexte canadien, les provinces doivent développer la souplesse de leur réseau grâce à leur capacité de production intérieure ou d'échanges avec d'autres États. Lorsqu'elle a fermé ses centrales au charbon, l'Ontario est passé à un modèle dans lequel le nucléaire et les énergies renouvelables constituent l'essentiel de la capacité de production de base, alors que le gaz naturel sert à répondre aux fluctuations de la demande. L'Alberta, la Saskatchewan, le Nouveau-Brunswick et la Nouvelle-Écosse pourraient adopter un modèle similaire. Ils pourraient aussi se concentrer sur le développement d'un réseau électrique reposant davantage sur la production à base de combustibles fossiles avec CSC.

### Réseaux de transport et de distribution

Les réseaux de transport et de distribution influent sur la viabilité des différents procédés de production d'électricité. Si les sites optimaux pour certains modes de production, comme l'éolien et la géothermie, sont éloignés des agglomérations, de nouvelles lignes de transport peuvent être nécessaires, ce qui entraîne une augmentation des coûts et des pertes électriques (Sims *et al.*, 2011). Pour les centrales avec CSC, le choix de l'emplacement doit réaliser un équilibre entre le coût de transport et le coût d'acheminement du dioxyde de carbone vers les sites d'entreposage. Les goulots d'étranglement ou points de congestion dans les réseaux de transport peuvent diminuer l'intérêt d'aménager des installations dans certaines régions. Au Canada, si les lignes de transport existantes sont congestionnées, il peut être difficile d'exploiter les solutions de production dans certaines parties du pays sans modernisation du réseau de transport.

Investir dans des lignes de transport et dans de nouvelles interconnexions accroît la flexibilité et la résilience du réseau. Une plus grande agrégation géographique des sources énergétiques intermittentes, par exemple, peut réduire les fluctuations d'électricité produite à cause des conditions météorologiques dans une vaste région (Sims *et al.*, 2011). Au Canada, relier ensemble plusieurs régions soumises à de forts vents par des lignes de transports à courant continu à haute tension pourrait grandement réduire la variation de l'électricité éolienne produite (Harvey, 2013). Accroître les interconnexions du réseau entre les régions (que ce soit entre les provinces ou entre les provinces et les États des États-Unis) apporte également de la flexibilité en permettant aux gestionnaires de réseau de mieux profiter du commerce de l'électricité pour équilibrer l'offre et la demande. Au pays, le Québec, Terre-Neuve-et-Labrador et le Manitoba pourraient vendre davantage d'hydroélectricité à faibles émissions à l'Ontario si des lignes de transport est-ouest étaient en place (ACG, 2012b, 2014).

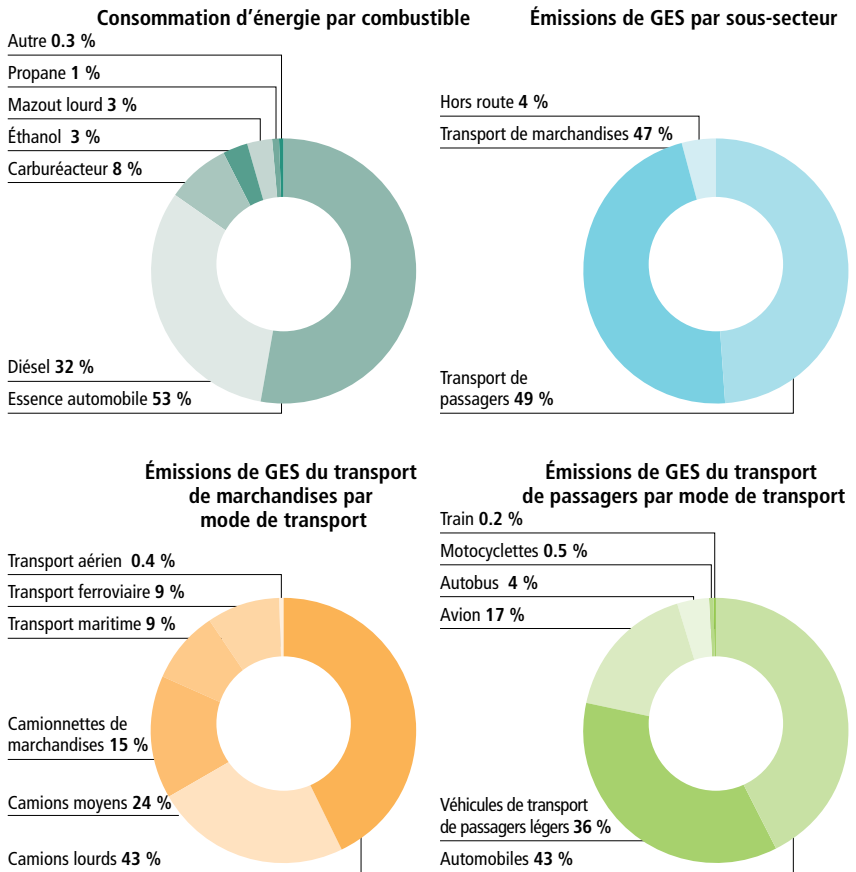
Le terme *production décentralisée* fait référence à l'utilisation de façon extrêmement distribuée de la production à petite échelle, souvent intégrée dans des communautés ou située à proximité de la demande. Un plus grand usage de la production décentralisée pourrait limiter les coûts et les pertes de transport en réduisant la distance entre les points de production et de consommation (Thomson et Infield, 2007; Sims *et al.*, 2011). Cependant, le recours accru à la production décentralisée pose d'autres défis aux gestionnaires de réseau, qui peuvent alors devoir gérer des installations de production plus nombreuses et plus diversifiées. Les réseaux de distribution actuels sont généralement conçus pour faciliter le flux d'électricité dans une direction : de la source de production au consommateur. Faire en sorte que l'électricité produite par des moyens décentralisés, comme les panneaux solaires résidentiels, soit reversée dans le réseau nécessite la modification de ce dernier. Une des conséquences est que la *modernisation du réseau électrique* (ce que l'on appelle communément *réseaux intelligents*), définie par l'Association canadienne de l'électricité comme « l'ajout au réseau électrique en place de dispositifs de communication bidirectionnelle, de commande et d'automatisation... » (ACÉ, 2015), permet une plus grande pénétration des énergies renouvelables et de la production décentralisée tout en facilitant l'utilisation optimale des moyens de production existants (ACÉ, 2014).

## 3.2 TRANSPORT

### Principales constatations

- Les réseaux de transport sont une vaste et croissante source d'émissions de gaz à effet de serre au Canada. Le transport de marchandises est l'activité de ce secteur dont les émissions augmentent le plus rapidement. Les réseaux actuels dépendent presque totalement de carburants d'origine pétrolière et la situation ne changera probablement pas si aucune politique d'atténuation des émissions plus stricte n'est adoptée.
- L'amélioration de l'efficacité énergétique pour les nouveaux véhicules et les stratégies de réduction de la demande peuvent limiter les émissions causées par le transport, à court terme. Cependant, pour que ces émissions soient importantes, il faudra passer à ces carburants et à des véhicules à faibles émissions.
- Les carburants à faibles émissions utilisés aujourd'hui dans les modes de transport offerts sur le marché sont les biocarburants, l'électricité, l'hydrogène et les combustibles fossiles de substitution, comme le diésel, le gaz naturel et le propane. En raison de leurs avantages et inconvénients relatifs, aucun de ces carburants et de ces véhicules n'est meilleur que les autres, quel que soit le domaine du transport considéré. L'électricité est la solution la plus prometteuse pour les véhicules de tourisme, alors que les biocarburants sont peut-être un choix plus viable pour le transport de marchandises en général.
- Les réseaux de transport dépendent des réseaux de production et de distribution du carburant, et les perspectives de la substitution interénergétique dépendront du degré auquel l'infrastructure de ravitaillement requise sera en place. L'aménagement urbain et les investissements dans l'infrastructure publique peuvent aussi faciliter la transition à des réseaux de transport et des communautés à faibles émissions.

À l'échelle planétaire, les produits pétroliers raffinés représentent 95 % de l'énergie consommée dans les réseaux de transport (Kahn Ribeiro *et al.*, 2012). Les carburants d'origine pétrolière, comme l'essence, le diésel et le carburant aviation, possèdent des avantages distincts en raison de leur facilité de transport et de leur densité énergétique, ainsi que du verrouillage technologique établi par la domination des moteurs à combustion interne et des réseaux de production et de distribution de carburant. Ils constituent également une source considérable et croissante d'émissions de gaz à effet de serre. Environ 38 % des émissions canadiennes de gaz à effet de serre issues de la production d'énergie proviennent du secteur du transport (RNCAN, 2014h). La figure 3.2 illustre la consommation d'énergie et les émissions actuelles du transport au Canada, par carburant et mode de transport. L'essence, le diésel et le carburant aviation remplissent plus de 90 %



Source des données : RNCan, 2014h

**Figure 3.2**  
**Consommation d'énergie et émissions de gaz à effet de serre du transport au Canada, 2012**

Les réseaux de transport au Canada dépendent énormément des produits pétroliers raffinés comme sources de carburant et rejettent donc un important volume d'émissions de gaz à effet de serre. Ensemble, l'essence automobile, le diésel et le carburant aviation représentent 93 % de l'énergie utilisée dans le secteur. Les émissions se répartissent approximativement à parts égales entre le transport de passagers et de marchandises, bien qu'elles augmentent plus rapidement dans le transport de marchandises. Le total peut ne pas être égal à 100 % en raison de l'arrondissement.

des besoins en énergie du transport au pays (RNCAN, 2014h). L'éthanol (le seul carburant à faibles émissions largement utilisé dans les véhicules canadiens) ne représente que 3 % de l'énergie employée pour le transport<sup>19</sup>. Le transport routier est le plus gros consommateur d'énergie et producteur d'émissions du secteur. Dans le domaine du transport de voyageurs, les voitures et les camionnettes sont responsables de plus des deux tiers des émissions, alors que dans le transport de marchandises, les camions rejettent 82 % des émissions (RNCAN, 2014h).

Les réseaux de transport au Canada et dans d'autres pays évoluent pour faire face aux transformations de la demande de services de transport provoquées par les tendances démographiques, sociales et économiques. À mesure que la population mondiale est plus concentrée dans les zones urbaines, les besoins en transport de voyageurs changent, ce qui pourrait accroître le recours aux réseaux de transport en commun et au transport non motorisé, mais aussi contribuer à la banlieusardisation et à la hausse de la demande de transport motorisé (Kahn Ribeiro *et al.*, 2012). L'équilibre entre les demandes reliées au transport de voyageurs et de marchandises est également en train de changer. Au Canada, la demande énergétique du transport routier de voyageurs ralentit et devrait chuter (tout comme les émissions de dioxyde de carbone) dans les années à venir, en partie à cause des normes de réduction de la consommation de carburant plus strictes adoptées par le gouvernement fédéral (ONÉ, 2013). Par contre, le transport de marchandises est en croissance et sera responsable d'une proportion de plus en plus grande des émissions rejetées par le transport (Environnement Canada, 2013c; ONÉ, 2013).

La présente section examine les améliorations de l'efficacité énergétique et les carburants et véhicules de substitution qui pourraient faciliter la transition vers un transport routier à faibles émissions dans deux domaines clés : (i) le transport de voyageurs par véhicule léger (la plus grande source d'émissions du transport); et (ii) le transport de marchandises (la source d'émissions qui connaît la croissance la plus rapide dans le transport). Elle se conclut par une rapide étude des facteurs systémiques concernant l'infrastructure de transport et les réseaux de production et de distribution de carburant qui freinent l'adoption à grande échelle des moyens à faibles émissions.

### 3.2.1 Amélioration de l'efficacité du réseau

Il existe une multitude de possibilités d'améliorer l'efficacité dans la plupart des réseaux de transport (AIE, 2012a; Kahn Ribeiro *et al.*, 2012; NRC, 2013; Sims *et al.*, 2014). Les études de modélisation révèlent que l'amélioration des véhicules est importante pour la réduction des émissions à court terme (J&C

---

19 Aucun chiffre n'était disponible pour l'utilisation du biodiésel au Canada.

Nyboer and Associates Inc., 2008; Sachs *et al.*, 2014) et pourrait, conjointement avec les changements de mode de transport et la diminution des besoins en déplacement, contribuer notablement à atténuer les émissions à plus long terme (Kahn Ribeiro *et al.*, 2012; Sims *et al.*, 2014). Au Canada, l'amélioration de l'efficacité pourrait principalement passer par des véhicules de transport de voyageurs et de marchandises plus efficaces (notamment des véhicules hybrides), l'adoption du transport en commun et la transition du transport de marchandises du camionnage au train (Sachs *et al.*, 2014). Pour ces raisons, le comité d'experts a porté son attention sur deux domaines clés de l'augmentation de l'efficacité : l'amélioration de la technologie des véhicules et le transfert modal qui réduit les besoins de déplacement.

### Efficacité des véhicules

La plupart des études révèlent que l'efficacité des véhicules à moteur à combustion interne conventionnel (véhicules légers comme véhicules lourds) pourrait être améliorée d'environ 30 à 50 % d'ici à 2050 des façons suivantes :

- *Meilleure efficacité du groupe motopropulseur* grâce à des dispositifs comme la transmission manuelle automatisée et la transmission à variation continue;
- *Récupération des pertes d'énergie du moteur, au ralenti et au freinage*, grâce à des concepts de moteur avancés, comme le calage et l'ouverture variables des soupapes, la turbocompression, l'injection directe, la désactivation de cylindres, la coupure du moteur à l'arrêt et le freinage régénératif;
- *Réduction des charges dues au poids du véhicule, au roulage et à la résistance de l'air*, grâce à des changements de conception et à l'utilisation accrue de matériaux légers (comme la fibre de carbone), à l'amélioration de la conception des pneus, des roulements et des joints de roue, à la réduction de la surface frontale des véhicules et au lissage de la carrosserie
- *Meilleure efficacité des accessoires*, comme la climatisation, l'assistance de direction, les essuie-glace et le système audio.

(AIE, 2012a; Kahn Ribeiro *et al.*, 2012; NRC, 2013; Sims *et al.*, 2014)

Inciter les conducteurs à changer leur comportement, soit accélérer plus progressivement, limiter le fonctionnement au ralenti et garder ses pneus à une pression appropriée, peut compléter les améliorations technologiques, améliorer encore l'efficacité et permettre à l'utilisateur de réaliser des économies de coût (AIE, 2012a). Des évolutions technologiques véhiculaires plus révolutionnaires pourraient aussi accélérer ou retarder les gains d'efficacité des véhicules de tourisme. Le développement des véhicules autonomes pourrait mener à d'autres gains d'efficacité découlant d'un trafic plus fluide, de la réduction de la congestion et d'une vitesse de circulation plus constante et moins élevée. Toutefois, ces véhicules pourraient aussi rendre la conduite plus pratique et encourager ainsi les déplacements en véhicule et mettre hors-jeu le transport en commun (Fagnant et Kockelman, 2015).

Les véhicules hybrides constituent une occasion majeure d'améliorer l'efficacité des véhicules légers, moyens et lourds. Grâce à l'utilisation combinée d'un moteur à combustion interne et d'une batterie et d'un moteur électrique, ils peuvent réduire d'environ 35 % la consommation de carburant par rapport à un véhicule comparable doté uniquement d'un moteur à combustion interne (Sims *et al.*, 2014). Cette baisse est due à plusieurs caractéristiques, dont la coupure du moteur à l'arrêt, à la décélération et en vitesse de croisière; des freins qui récupèrent l'énergie quand ils sont actionnés (freinage régénératif); des moteurs moins gros grâce à l'ajout du moteur électrique; l'électrification plus facile des accessoires comme l'assistance de direction; un moteur fonctionnant de manière plus efficace à des charges plus faibles; et des cycles de fonctionnement moteur plus efficaces (NRC, 2013). Le changement du carburant utilisé dans les véhicules peut produire des gains d'efficacité plus importants : les groupes motopropulseurs entièrement électriques des véhicules électriques à batterie (VEB) et des véhicules à pile à combustible (VPC) à hydrogène sont bien plus efficaces que les groupes motopropulseurs des véhicules à moteur à combustion interne (voir la section 3.2.2).

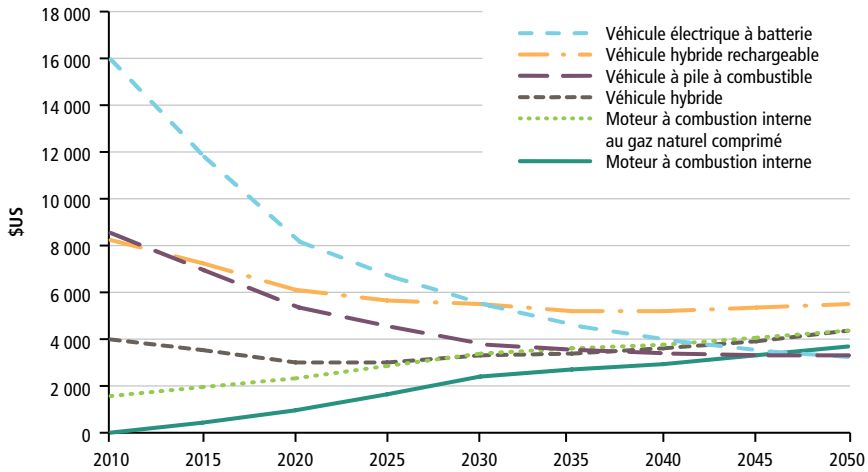
De nombreuses améliorations de l'efficacité des véhicules peuvent être réalisées à des coûts faibles, voire négatifs si l'on tient compte des économies de carburant sur la durée de vie du véhicule (Sims *et al.*, 2014). Pour les véhicules légers et les véhicules lourds gros porteurs, des gains d'efficacité jusqu'à 50 % sont possibles avec des solutions à coûts très bas ou négatifs (Sims *et al.*, 2014). Cependant, la faiblesse des coûts ne signifie pas que ces améliorations se produiront sans aide politique ou réglementaire. L'amélioration de l'efficacité est fréquemment entravée par des obstacles financiers, comportementaux et institutionnels. Par exemple, les consommateurs essayent rarement de minimiser les coûts de carburant sur le cycle de vie quand ils achètent un véhicule, notamment parce que l'information dont ils disposent est imparfaite, parce qu'ils sont surchargés de renseignements et parce qu'ils n'ont pas de certitude quant aux coûts futurs de véhicule et de carburant (Anderson *et al.*, 2011; Small, 2012; Allcott et Wozny, 2013). Les consommateurs et les entreprises peuvent aussi résister aux changements opérationnels visant à améliorer l'efficacité énergétique (comme rouler à plus faible vitesse) et avoir des préférences opposées à la maximisation de l'efficacité (comme préférer les gros véhicules). Réduire les coûts de déplacement grâce à l'amélioration de la consommation de carburant peut finalement encourager l'augmentation des déplacements, et donc annuler partiellement les réductions d'émissions découlant des gains d'efficacité. Des études menées en Amérique du Nord estiment qu'une réduction de 50 % des coûts de carburant entraînerait une augmentation de 2,5 à 15 % des déplacements en voiture (Sims *et al.*, 2014). Le rythme et le coût des possibles gains d'efficacité sont aussi partiellement limités par le taux de renouvellement des immobilisations relatives aux flottes de véhicules et par l'infrastructure de transport actuelle (comme les réseaux ferroviaires et routiers).

### Transfert modal et réduction des besoins en déplacements

Dans le secteur du transport, la demande énergétique peut être réduite grâce au transfert modal (changement du type de transport utilisé) et aux déplacements évités. Le transfert modal du véhicule personnel au transport en commun peut améliorer l'efficacité du carburant consommé (en présumant que la consommation est raisonnable), tout comme le passage à un mode actif de transport, tel que la marche ou vélo. Le transfert modal peut avoir d'autres avantages, par exemple la réduction du volume de circulation et de la congestion routière, la réduction de la pollution atmosphérique urbaine et l'apport des bienfaits pour la santé de l'exercice (Kahn Ribeiro *et al.*, 2012; Sims *et al.*, 2014). Dans le transport de marchandises, le transfert modal du camion au train entraîne d'importantes économies d'énergie. L'AIE (2009c) estime que transférer entre 2010 et 2050 la moitié du transport par camionnage mondial au transport ferroviaire se traduirait par une réduction d'environ 15 % de la consommation d'énergie. Les besoins en déplacements peuvent aussi être réduits par des stratégies comme l'accroissement de la densité urbaine, la restructuration des systèmes d'acheminement des marchandises et l'utilisation des technologies de l'information et des communications pour le magasinage en ligne et les télécommunications (Sims *et al.*, 2014) (les réseaux de transport en zone urbaine sont examinés à la section 3.2.3). L'autopartage peut aussi améliorer l'efficacité des déplacements et diminuer les émissions par passager-kilomètre. Il s'agit d'une solution particulièrement intéressante pour les zones à faible densité de population et peu propices au transport en commun.

#### 3.2.2 Substitution interénergétique dans les réseaux de transport

Malgré les immenses possibilités d'améliorer l'efficacité des véhicules, les études de modélisation réalisées au Canada révèlent que l'atteinte de réductions substantielles des émissions à moyen et long terme dans le secteur du transport dépend principalement du passage aux carburants de substitution (J&C Nyboer and Associates Inc., 2008; Sachs *et al.*, 2014). Nombre des carburants et technologies connexes, comme les véhicules hybrides, les véhicules hybrides rechargeables, les véhicules électriques à batterie et les véhicules à pile à combustible à hydrogène, ont bénéficié des intenses efforts de développement déployés ces vingt dernières années, et les consommateurs nord-américains disposent à présent d'un vaste éventail d'options. Bien que les véhicules de substitution demeurent plus coûteux que les véhicules à moteur à combustion interne conventionnel, leur prix devrait baisser avec le temps, à mesure que les technologies s'amélioreront, que la production augmentera et que des économies d'échelle supplémentaires seront réalisées (NRC, 2013) (voir la figure 3.3).



Reproduit avec la permission de la National Academy of Sciences; voir NRC, 2013

Figure 3.3

### Augmentation projetée des coûts de véhicule par rapport à la référence de 2010

Si les coûts des véhicules fonctionnant aux carburants de substitution sont actuellement supérieurs à ceux des véhicules à essence avec moteur à combustion interne conventionnel, ils devraient baisser graduellement avec l'apprentissage technologique continu et les économies d'échelles. Les coûts estimés ci-dessus sont en \$US et représentent les coûts de fabrication directs pour le constructeur par rapport aux coûts de référence de 2010, pour un véhicule léger à moteur à combustion interne d'un prix de détail de 26 341 \$US.

Les carburants de substitution se répartissent en quatre catégories principales : carburants fossiles à faibles émissions (c.-à-d. diésel, gaz naturel et propane), biocarburants, électricité et hydrogène. Ils diffèrent selon leurs propriétés essentielles, comme leur densité énergétique, leur facilité de transport et leur effet sur les performances des véhicules. Ces carburants et les technologies véhiculaires associées se distinguent également dans leurs répercussions sur la pollution de l'air ambiant et sur la santé de la population (voir l'encadré 3.3). Aucune technologie et aucun carburant n'est meilleur que les autres, quel que soit le secteur, et étant donné l'état actuel du développement technologique, il est difficile de prévoir si l'un d'entre eux sera plus utilisé dans le transport dans le futur ni de combien sera l'augmentation. Le tableau 3.3 compare les technologies selon divers impacts : émissions du puits à la roue, coûts de véhicule et de carburant, autonomie et répercussions du ravitaillement et obstacles ou contraintes systémiques susceptibles de se dresser devant leur adoption (examinés à la section 3.2.3). Étant donné les coûts supérieurs des véhicules de substitution et les obstacles comportementaux et institutionnels, les carburants d'origine pétrolière et les moteurs à combustion interne conserveront certainement leur position dominante à moyen à long terme, sauf si d'importants changements politiques sont apportés.

### Encadré 3.3

#### Émissions des véhicules et pollution de l'air ambiant

En plus des émissions de gaz à effet de serre, les véhicules à moteur à combustion interne produisent des émissions d'échappement qui elles aussi sont nuisibles. Les rejets automobiles d'autres polluants, tels que les composés organiques volatils, l'oxyde nitreux, le benzène, le monoxyde de carbone et les matières particulaires, ont de nombreux effets sur la santé, comme la hausse de la mortalité, les troubles respiratoires, les maladies cardiovasculaires et les troubles de la reproduction (OMS, 2011). Les études qui monétisent le coût pour la société des impacts négatifs sur la santé de la combustion du carburant des véhicules relèvent souvent que les coûts de la pollution de l'air due à des substances autres que les gaz à effet de serre dépassent les coûts estimés attendus des conséquences des changements climatiques (Hill *et al.*, 2009; Michalek *et al.*, 2011; Tessim *et al.*, 2014). Des chercheurs ont également découvert que le passage à des technologies à faibles émissions pourrait être extrêmement bénéfique pour la santé publique. Par exemple, West *et al.* (2013) ont constaté que l'atténuation mondiale des gaz à effet de serre (qu'ils proviennent ou non du transport) pourrait se traduire par une réduction de 1,4 à 3 millions de décès prématurés en 2100 en raison des retombées qu'elle aurait sur la réduction de la pollution de l'air.

Tableau 3.3

#### Comparaison des véhicules et carburants de substitution

	Émissions de GES du puits à la roue par rapport aux moteurs à combustion interne (%)	Coûts de véhicule et de carburant		Autonomie et répercussions du ravitaillement	Obstacles et défis systémiques
		Coûts de carburant (\$US par équivalent gallon d'essence)	Coût de véhicule additionnel		
Essence	100		Non disponible*	<ul style="list-style-type: none"> <li>Autonomie moyenne des véhicules légers ~480 km.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Infrastructure actuelle conçue pour ces carburants.</li> </ul>
Diésel	73	\$3.38	Non disponible*	<ul style="list-style-type: none"> <li>Amélioration de l'autonomie par rapport à l'essence.</li> </ul>	

suite à la page suivante

	Émissions de GES du puits à la roue par rapport aux moteurs à combustion interne (%)	Coûts de véhicule et de carburant		Autonomie et répercussions du ravitaillement	Obstacles et défis systémiques
		Coûts de carburant (\$US par équivalent gallon d'essence)	Coût de véhicule additionnel		
<b>Gaz naturel</b>	56–94	\$2,16	+\$1 921	<ul style="list-style-type: none"> <li>Autonomie réduite; peut être compensée par des réservoirs supplémentaires sur les véhicules moyens et lourds.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Avantage de l'infrastructure de production et de distribution du méthane.</li> <li>Nécessiterait l'extension du réseau de stations-service.</li> <li>Possibilité d'émissions fugitives.</li> </ul>
<b>Bio-carburants</b>	18–121 (Élevées ou faibles, selon les effets indirects sur l'affectation des terres)	\$4,07–\$4,25 (E85,B100)	0 pour les bio-carburants prêts à l'emploi	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les mélanges à forte teneur en éthanol limitent les économies de consommation et l'autonomie.</li> <li>L'autonomie permise par le biodiésel est comparable à celle du diésel d'origine pétrolière.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Augmentation des impacts environnementaux et agricoles avec la production.</li> <li>Capacité d'expansion de la production d'éthanol de grain de maïs limitée avec la productivité actuelle.</li> </ul>
<b>Véhicules hybrides</b>	71	\$3,34 (Essence)	+\$3 510	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le moteur à essence atténue les craintes concernant l'autonomie et le ravitaillement.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dépend de l'infrastructure existante.</li> </ul>

suite à la page suivante

	Émissions de GES du puits à la roue par rapport aux moteurs à combustion interne (%)	Coûts de véhicule et de carburant		Autonomie et répercussions du ravitaillement	Obstacles et défis systémiques
		Coûts de carburant (\$US par équivalent gallon d'essence)	Coût de véhicule additionnel		
<b>VHR</b>	4–113 (Pratiquement nulles avec l'électricité à faible CO <sub>2</sub> )	\$1,24 (electricity only)	+\$7 282	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le moteur à essence atténue les craintes concernant l'autonomie et le ravitaillement.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Installation de bornes de recharge rapide.</li> <li>Modernisation des réseaux de transport et de distribution.</li> <li>Extension du réseau pour répondre à la hausse de la demande.</li> </ul>
<b>VEB</b>	3–92 (Pratiquement nulles avec l'électricité à faible CO <sub>2</sub> )	\$1,24 (electricity only)	+\$11 809	<ul style="list-style-type: none"> <li>Autonomie ~160 km.</li> <li>Recharge longue ou nécessitant des bornes de recharge rapide spéciales.</li> </ul>	
<b>VPC</b>	6–57 (Presque nulles avec l'hydrogène produit par CSC ou par électrolyse)	\$3,68	+\$6 954	<ul style="list-style-type: none"> <li>Autonomie et temps de ravitaillement comparables aux véhicules conventionnels.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Extension des installations de production d'hydrogène.</li> <li>Développement de l'infrastructure de distribution et des stations-service.</li> </ul>

La plage des émissions du puits à la roue est basée sur Creutzig (2011) et Creutzig (2010) et calculée selon les g éqCO<sub>2</sub>/MJ livrés aux roues. Les émissions des biocarburants incluent les effets indirects et directs estimés, bien que les estimations des effets indirects varient notablement selon l'option méthodologique. Les coûts de carburant dont indiqués en \$US par équivalent gallon d'essence et sont fondés sur le prix de détail moyen aux États-Unis en 2014. Les coûts d'hydrogène correspondent à une estimation effectuée par le DOE (2012). Les coûts de véhicule sont les coûts différentiels estimés pour un véhicule léger par rapport à un véhicule conventionnel à essence avec moteur à combustion interne en 2015, en \$US, par NRC (2013). \*Les coûts de véhicule pour les véhicules au diésel ne sont pas inclus parce que NRC (2013) ne les a pas analysés présumant que leurs avantages sur le plan de l'efficacité et des émissions par rapport aux véhicules à essence devraient diminuer avec le temps.

### Carburants à faibles émissions issus de sources fossiles<sup>20</sup>

Les véhicules diesel consomment moins de carburant que les véhicules à essence et rejettent donc moins d'émissions de dioxyde de carbone. Les véhicules légers au diesel — qui sont dotés d'un moteur à allumage par compression plus efficace que les moteurs à étincelles des véhicules à essence — produisent de 12 à 15 % moins d'émissions de gaz à effet de serre par kilomètre parcouru que les véhicules légers à essence (Schlömer *et al.*, 2014). Les véhicules au gaz naturel rejettent eux aussi moins d'émissions de dioxyde de carbone par kilomètre que les véhicules à essence ou diesel. Le gaz naturel est employé pour alimenter les véhicules sous deux formes : gaz naturel comprimé (GNC) et gaz naturel liquéfié (GNL). Le propane, également appelé gaz de pétrole liquéfié ou GPL, est un autre carburant gazeux pouvant être utilisé pour alimenter les véhicules légers, moyens et lourds. L'autonomie des véhicules au gaz naturel est généralement moindre que celle des véhicules à essence ou diesel, à cause de leur plus faible teneur énergétique; cependant, l'ajout de réservoirs peut partiellement compenser ce défaut (DOE, 2015b). Les véhicules au propane offrent une autonomie comparable à celle des véhicules conventionnels (DOE, 2015b). Le ravitaillement dans ces carburants peut être relativement rapide et ne pose pas de difficulté particulière aux consommateurs, autres que la disponibilité actuelle limitée de stations-service. En ce qui concerne les carburants gazeux, le GNC est l'option la plus économique, alors que le propane est la solution la plus coûteuse (DOE, 2015a).

Si les carburants comme le gaz naturel sont de moins grands émetteurs par comparaison avec l'essence et le diesel, leurs avantages peuvent être partiellement annulés par les émissions fugitives de la production et de la distribution du gaz (voir l'encadré 3.8 sur les émissions fugitives). Par conséquent, si certaines estimations laissent penser que le gaz naturel permettrait une réduction des émissions de près de 50 % par rapport à l'essence (Creutzig, 2010; Creutzig *et al.*, 2011), une analyse de l'Argonne National Laboratory aux États-Unis a révélé que les émissions du puits à la roue (émissions fugitives comprises) des véhicules légers au GNC ou au GNL n'étaient que de 6 à 11 % inférieures à celles des véhicules à essence, les possibilités de réduction des émissions des deux formes de gaz naturel étant pratiquement identiques (DOE, 2015b). D'autres évaluations portent à croire que la réduction des émissions durant le

---

20 Les combustibles fossiles peuvent aussi être employés pour produire du méthanol et autres carburants synthétiques. Le méthanol (alcool de bois) possède des propriétés similaires à celles de l'éthanol (voir la section sur les biocarburants) et produit moins d'émissions de carbone que l'essence au point de combustion. L'oxyde de diméthyl est une solution synthétique de rechange au diesel. Il peut réduire les matières particulaires, bien que sa densité énergétique soit la moitié de celle du diesel classique et qu'il nécessite donc des réservoirs plus grands pour offrir une autonomie comparable (DOE, 2015b).

cycle de vie serait de l'ordre de 10 à 15 % (Sims *et al.*, 2014). On estime que le propane apporte des réductions des émissions du puits à la roue d'environ 10 % par rapport à l'essence (DOE, 2015b).

### Biocarburants

Les biocarburants sont constitués de tout carburant liquide produit à partir de charge organique (c.-à-d. biomasse). Leurs matières de base, leurs filières de transformation et les carburants eux-mêmes sont extrêmement variés. Cependant, actuellement seuls deux biocarburants, l'éthanol et le biodiésel, bénéficient d'une large production commerciale. L'éthanol est produit à partir du maïs, du blé ou d'autres matières végétales par fermentation des sucres à l'aide de levures. Comme l'éthanol pur possède une densité énergétique inférieure d'environ 30 % à celle de l'essence, les véhicules alimentés au moyen de mélanges à forte teneur en éthanol consomment plus et leur autonomie est plus faible (DOE, 2015b)<sup>21</sup>. Le biodiésel, un analogue au diésel conventionnel produit à partir de la biomasse, peut être tiré d'une gamme de matières, comme le soya, le canola, l'huile de cuisson et le gras animal. Il possède une densité énergétique légèrement inférieure (93 %) à celle du diésel conventionnel (DOE, 2015b) et peut donc mener à une consommation légèrement supérieure, mais il n'a que peu d'incidence sur les performances du véhicule. Un des inconvénients du biodiésel — qu'il partage avec le diésel classique, quoiqu'à un degré moindre — est sa tendance à cristalliser par temps froid.

Les biocarburants évolués pourraient prendre de l'importance dans le futur. Il s'agit de carburants tirés de charges lignocellulosiques (matières végétales ligneuses, comme les résidus de culture ou les déchets forestiers) et d'algues (AIE, 2011). Les biocarburants lignocellulosiques pourraient calmer les craintes concernant le recours aux cultures vivrières comme matière première et améliorer le potentiel de réduction des émissions des carburants et l'équilibre énergétique (le rapport entre l'énergie utilisée dans la production et l'énergie offerte par le carburant) (Creutzig *et al.*, 2011; AIE, 2011; Kahn Ribeiro *et al.*, 2012).

Quel que soit le biocarburant, le choix de la matière première et du procédé de transformation et les répercussions associées sur l'affectation des terres et la teneur en carbone du sol ont une énorme incidence sur les émissions finales

---

21 L'utilisation de mélanges essence-éthanol est répandue en Amérique du Nord (l'ajout d'éthanol à l'essence oxygène le carburant et réduit les émissions à l'échappement).

de dioxyde de carbone<sup>22</sup>. Les estimations de la réduction des émissions pour l'éthanol, par exemple, donnent des résultats qui varient de négatifs (c.-à-d. l'éthanol de grain de maïs pourrait accroître les émissions de gaz à effet de serre) à largement positifs, dans le cas de l'éthanol de canne à sucre et de l'éthanol cellulosique (Creutzig *et al.*, 2011; AIE, 2011). La réduction des émissions permise par le biodiésel est souvent supérieure à celle associée à l'éthanol. Si l'on inclut les émissions indirectes, l'utilisation du biodiésel devrait se traduire par une réduction par rapport au diesel conventionnel de l'ordre de 20 %, dans le cas du soya du Midwest américain, à 80 %, pour le biodiésel tiré des déchets de graisse de la restauration (Creutzig *et al.*, 2011).

### Électricité — Véhicules hybrides rechargeables et véhicules électriques à batterie

L'électricité peut servir de source d'énergie au transport automobile dans différents types de véhicules. Les véhicules hybrides l'utilisent comme source auxiliaire pour compléter l'énergie produite par la combustion d'un carburant liquide, comme l'essence, le diesel ou l'éthanol. Les VHR et les VEB peuvent, eux, fonctionner exclusivement à l'électricité. Les véhicules hybrides rechargeables sont semblables aux véhicules hybrides standards, à la différence près qu'il est possible de recharger électriquement leurs batteries et que ces batteries sont plus volumineuses pour permettre la conduite sur des distances modérées en mode électrique seulement (DOE, 2015b). Les VHR actuels peuvent fréquemment rouler de 15 à 65 kilomètres à l'électricité avant que le moteur à essence ne soit nécessaire. Les VEB fonctionnent entièrement à l'électricité, ce qui élimine le besoin d'un moteur à combustion interne et donc réduit le poids du véhicule et accroît son efficacité. Les fabricants de VEB ciblent actuellement une autonomie de 160 kilomètres à partir d'une pleine charge (DOE, 2015b) et peu de VEB abordables devraient dépasser cette distance dans un futur proche (NRC, 2013). Par comparaison, les véhicules conventionnels peuvent parcourir en moyenne 480 kilomètres avec un réservoir d'essence (NRC, 2013). Les VEB doivent donc être ravitaillés (rechargés) plus fréquemment que les véhicules

---

22 Les biocarburants sont traditionnellement considérés comme ayant des émissions nettes faibles parce que les émissions de carbone rejetées durant leur combustion sont compensées par l'absorption de carbone par la biomasse servant à les produire. Cependant, ce calcul ne tient compte que des émissions directes et non des émissions dues à la production de cette biomasse (par exemple, les émissions résultant de l'emploi d'engrais), au fonctionnement du matériel agricole, au transport de la biomasse ou à la production et à la distribution du carburant. Cette perception ne tient pas non plus compte des éventuels impacts secondaires (indirects) sur l'affectation des sols. Les émissions du puits à la roue (cycle de vie) des divers biocarburants sont un sujet extrêmement controversé et qui fait l'objet d'une intense recherche, particulièrement en ce qui concerne les émissions découlant des changements indirects de l'affectation des sols — voir Smith (2014), Finkbeiner (2014), Wicke (2012) et NRC (2011) pour une étude à ce propos.

conventionnels, un ravitaillement qui dure aussi plus longtemps, bien que contrairement aux véhicules à essence, leur recharge puisse s'effectuer à la maison pendant la nuit ou au travail<sup>23</sup>.

Les batteries sont un élément essentiel de tous les véhicules électriques et leurs caractéristiques ont une énorme incidence sur le poids, les dimensions, le coût et l'autonomie de ces derniers. Certains véhicules électriques actuels possèdent des batteries au nickel-métal-hydrure; cependant, les véhicules de demain disposeront probablement d'accumulateurs au lithium-ion, qui sont plus coûteux, mais aussi plus compacts et légers (NRC, 2013). Le temps de charge des batteries est un frein important pour les consommateurs. La plupart des VHR et des VEB peuvent être rechargés par branchement à une prise résidentielle standard de 120 volts. Cependant, cette méthode n'ajoute que de 3 à 8 kilomètres d'autonomie par heure de charge (DOE, 2015b). Pour accélérer le temps de charge, il est nécessaire de disposer d'une connexion à courant continu de plus haute tension et une borne de recharge spécialisée, qui peuvent fournir de 80 à 110 kilomètres d'autonomie supplémentaire en 20 minutes (DOE, 2015b).

Les VEB ne produisent pas d'émissions d'échappement et les véhicules hybrides rechargeables peuvent fonctionner pratiquement sans émissions d'échappement quand ils roulent principalement à l'électricité. Cependant, les émissions de dioxyde de carbone amont et autres polluants des véhicules électriques dépendent de la source d'électricité employée. Les VEB alimentés à l'électricité tirée de centrales au charbon, par exemple, peuvent augmenter les émissions de gaz à effet de serre par rapport aux véhicules à essence (Tessum *et al.*, 2014). Par contre, ceux qui emploient de l'électricité provenant de sources à faibles émissions rejettent peu d'émissions de dioxyde de carbone et peuvent se solder par d'importantes réductions d'autres polluants atmosphériques (Tessum *et al.*, 2014). Dans le contexte canadien, les véhicules électriques pourraient tirer parti des réseaux électriques à émissions relativement faibles dans la plupart des régions. L'électricité est également un carburant relativement économique en raison de la grande efficacité des moteurs électriques, qui sont en moyenne 3,4 fois plus efficaces que les moteurs à combustion interne à essence standards, et de son faible prix en Amérique du Nord (DOE, 2015a). En janvier 2015, l'électricité nécessaire aux États-Unis pour fournir la quantité

---

23 Le concept de systèmes d'échange de batteries est une solution étudiée pour résoudre ce problème. Il consiste à aménager des stations dédiées qui, au moyen d'un équipement spécialisé, remplaceraient rapidement une batterie épuisée par une batterie complètement chargée. Toutefois, cette méthode nécessiterait un important ajout d'infrastructure et pourrait se heurter aux craintes des consommateurs concernant la qualité, la fiabilité et la longévité des batteries. Un réseau de stations de ce genre est actuellement en formation en Israël (NRC, 2013).

d'énergie équivalente à un litre d'essence coûtait 47 % moins que l'essence elle-même (DOE, 2015b). Il est probable que les résultats seraient similaires pour le Canada, même si le prix de l'essence et de l'électricité varie d'une région à l'autre.

### Hydrogène —Véhicules électriques à pile à combustible

L'hydrogène est aussi un carburant à faibles émissions potentiel quand il est employé pour produire de l'électricité à partir de piles à combustible. Dans les véhicules à pile à combustible (VPC), l'électricité servant à alimenter le moteur est tirée d'une pile et d'un dispositif de stockage d'hydrogène embarqué au lieu d'un bloc-batterie. Le véhicule doit être réapprovisionné à une station-service spécialisée en hydrogène et l'hydrogène est stocké à bord, soit sous forme de gaz comprimé soit sous forme liquide à basse température. Le stockage de l'hydrogène est un défi technique d'envergure pour les VPC et les véhicules actuels comportent des réservoirs en matériau composite à renfort en fibre de carbone (NRC, 2013). Ces véhicules possèdent aussi généralement des batteries qui servent à récupérer l'énergie du freinage régénératif, à compléter l'énergie fournie par la pile à combustible et à réchauffer la pile par temps froid (NRC, 2013). Si les piles à combustible à hydrogène sont utilisées comme source d'énergie dans de multiples véhicules, des chariots élévateurs (quand les émissions d'échappement à l'intérieur sont un risque pour la sécurité) aux vaisseaux spatiaux habités, leur usage dans le transport routier n'est pas très répandu à ce jour. Cependant, des constructeurs comme Hyundai, Daimler, Honda et Toyota prévoient introduire leurs premiers modèles de VPC commerciaux dans certains marchés en 2015 (NRC, 2013).

Les VPC ne rejettent pas d'émissions d'échappement autres que de la vapeur d'eau et de l'air chaud (DOE, 2015b), mais peuvent entraîner des émissions en amont selon la façon dont l'hydrogène est produit. La majeure partie de la production actuelle d'hydrogène repose sur le vaporeformage du gaz naturel (l'option la plus économique), qui rejette des émissions de gaz à effet de serre à cause de la combustion du gaz naturel et des émissions fugitives. Cependant, alimenter un VPC à l'hydrogène tiré d'une telle source permettrait encore de réduire les émissions de 40 % par rapport à un véhicule à essence, en raison de la plus faible teneur en carbone du gaz naturel et de la plus grande efficacité de la pile à combustible (DOE, 2012). Lorsque l'hydrogène est produit à l'aide de sources à faibles émissions, comme la biomasse cellulosique ou le gaz naturel renouvelable, la réduction des émissions du puits à la roue peut être de l'ordre de 83 à 85 % (DOE, 2012). Quand l'hydrogène est produit par électrolyse, les émissions dépendent de la source de production d'électricité et peuvent avoisiner zéro.

Si l'hydrogène n'est pas actuellement disponible comme carburant automobile dans la plupart des endroits, des études estiment que le coût du carburant à la pompe, taxes exclues, devait être de l'ordre de 0,92 à 1,53 \$US par équivalent litre d'essence, le bas de la fourchette correspondant à l'hydrogène produit à partir du vaporeformage du gaz naturel et le haut, à l'hydrogène issu de l'électrolyse décentralisée (NRC, 2013). Les VPC sont environ deux fois plus efficaces que les véhicules conventionnels à moteur à combustion interne; par conséquent, le coût global du carburant peut être relativement faible une fois les économies d'échelle réalisées. Présument que la production d'hydrogène intègre le CSC pour réduire les émissions, le NRC (2013) estime que les coûts annuels de carburant pour un VPC en 2030 équivaldraient approximativement à 65 % des coûts pour un véhicule à essence.

### Substitution interénergétique dans le transport de voyageurs et de marchandises

L'incidence du choix du carburant et du véhicule de substitution sur l'autonomie et le ravitaillement diffère en importance selon le type de déplacement et le mode de transport. Le transport de voyageurs en zone urbaine se déroule dans des zones géographiques plutôt concentrées, comporte des déplacements relativement courts, répétés et entrecoupés de fréquents moments où les véhicules sont arrêtés et peut s'effectuer au moyen de véhicules de petite taille. Par comparaison, le transport de marchandises longue distance requiert souvent que les véhicules roulent sur de très nombreux kilomètres et de manière continue ou pratiquement continue durant de longues périodes et nécessite de gros véhicules capables de transporter de lourdes charges.

Pour le transport de marchandises par camion gros porteur, le passage à un système de propulsion de substitution, comme les moteurs électriques alimentés par batterie ou par piles à combustible, nécessiterait probablement une importante baisse des exigences en ce qui concerne l'autonomie (Fulton et Miller, 2015). Les camions diesel actuels peuvent franchir plus de 1 600 kilomètres avec un plein. Les véhicules au GNL et les VPC à l'hydrogène peuvent, eux, rouler pendant 800 kilomètres, mais nécessitent alors un bien plus grande capacité de stockage du carburant que les camions diesel classiques (Fulton et Miller, 2015). Les camions électriques à batterie pourraient théoriquement atteindre une autonomie semblable, mais au prix de blocs-batteries très volumineux qui les alourdiraient considérablement (Fulton et Miller, 2015). L'importance du temps de recharge des camions électriques peut être un obstacle à l'adoption de ce type de propulsion, surtout sans borne de recharge rapide. Le biodiesel constitue l'option la plus intéressante pour le camionnage longue distance dans de nombreux cas parce qu'il ne nuit pas à l'autonomie et ne requiert pas d'autre changement opérationnel. Toutefois, les VEB (tout comme les véhicules

hybrides) peuvent être une solution plus facilement applicable aux camions légers et moyens, comme les camions de livraison et les camions à ordures, qui parcourent des distances réduites et s'arrêtent et redémarrent fréquemment, ce qui facilite les économies d'énergie par le freinage régénératif (Sims *et al.*, 2014). Les autobus de transport en commun peuvent également être électrifiés à l'aide de blocs-batteries ou de systèmes à caténaire.

L'électricité est plus rentable pour le transport de voyageurs et les véhicules légers, car les problèmes d'autonomie sont moins graves. Les véhicules peuvent être rechargés à partir de prises standards quand ils ne sont pas utilisés. L'aménagement de bornes de recharge rapide peut aussi être concentré dans les zones urbaines, alors que pour le camionnage longue distance, la construction de l'infrastructure de recharge devra aussi s'effectuer le long des principales routes de transport entre les villes. Les VHR permettent d'utiliser principalement l'électricité pour répondre aux besoins en déplacements des voyageurs, tout en préservant la capacité de recourir à l'essence pour les trajets interurbains plus longs.

### 3.2.3 Considérations systémiques relatives au transport

Les gens et les entreprises peuvent directement contribuer à la réduction des émissions en investissant dans des véhicules plus efficaces ou dans des véhicules fonctionnant avec un carburant à faibles émissions, en passant à un mode de transport à faibles émissions, comme le transport en commun ou la marche et le vélo, ou en réduisant leurs besoins en déplacements. Les possibilités de telles stratégies dépendent toutefois de facteurs systémiques relatifs aux réseaux de transport et à leur dépendance à une infrastructure à longue durée de vie. Le comité d'experts a formulé deux paramètres clés touchant le potentiel de réduction des émissions :

- La production et la distribution du carburant et les systèmes et l'infrastructure de ravitaillement;
- Le modèle urbain et l'infrastructure de transport.

### Systèmes et infrastructure

Les carburants de substitution diffèrent dans le degré auquel ils exigent des changements à grande échelle aux systèmes de production et de distribution et à l'infrastructure de ravitaillement. Par exemple, le gaz naturel et le propane sont facilement accessibles en Amérique du Nord et nécessiteraient peu de modifications des réseaux de production et de distribution déjà bien établis. De nouveaux investissements seraient requis pour la construction de stations-service supplémentaires et l'installation de l'équipement de distribution. Cependant, des stations de ravitaillement en GNL et en GNC existent déjà dans certaines régions des États-Unis, en particulier pour le camionnage longue distance (DOE, 2015b).

Les véhicules électriques bénéficient de l'infrastructure existante sous la forme des centrales électriques et des réseaux électriques. L'adoption généralisée de ces véhicules serait toutefois limitée en partie par la disponibilité de bornes de recharge rapide dédiées. Le recours croissant à l'électricité pour répondre aux besoins en transport accroîtra la demande sur les réseaux électriques et pourrait exiger de modestes extensions de réseau et l'installation de nouvelles lignes de transport à haute tension. Cependant, en raison de la plus grande efficacité des moteurs électriques, l'ajout de véhicules électriques n'aurait qu'un effet relativement faible sur la demande générale en électricité. Hydro-Québec estime que l'électricité consommée par un million de véhicules électriques correspondrait à moins de 2 % des ventes totales d'électricité au Québec en 2009 (Hydro-Québec, s.d.b). L'incidence des véhicules électriques sur le réseau varie également selon le moment de la journée ou de la semaine (NRC, 2013). Si la recharge est effectuée durant les heures de pointe, de nouvelles centrales électriques flexibles peuvent être nécessaires. Par contre, elles peuvent se révéler inutiles si la recharge s'effectue durant les heures creuses, la nuit par exemple.

Les besoins en infrastructure pour les VPC à hydrogène sont énormes, car il existe très peu de stations-service distribuant de l'hydrogène au Canada — il devrait y en avoir environ 50 en exploitation aux États-Unis d'ici à la fin de 2015 (DOE, 2015b). L'hydrogène est utilisé à diverses fins dans le secteur industriel et l'intensification de son emploi comme carburant de transport peut partiellement exploiter les systèmes de distribution d'hydrogène actuels, comme les pipelines, les remorques porte-tubes à haute pression et les navires-citernes à hydrogène liquéfié (DOE, 2015b). Cependant, de nouvelles installations de production et une nouvelle infrastructure de ravitaillement seront nécessaires si les VPC se répandent. Le coût des nouvelles installations de production d'hydrogène variera selon le mode de production. Une filière de développement de l'hydrogène axé sur la production à faibles émissions (p. ex. qui intègre le CSC ou qui repose sur l'électrolyse à partir de l'électricité à faibles émissions ou sur la gazéification de la biomasse) entraînerait des coûts supérieurs à ceux d'une filière s'appuyant sur le vaporeformage du gaz naturel (NRC, 2013). La construction d'un réseau de production fortement décentralisé éliminerait la nécessité de transporter de gros volumes d'hydrogène sur de longues distances. Selon le NRC (2013), le ravitaillement en hydrogène commencerait probablement par la livraison par camions à partir de points de distribution locaux, et pourrait ensuite passer à des stations-service dotées d'une capacité de production.

Les biocarburants posent des difficultés uniques en ce qui concerne les procédés de production et l'évolutivité. Étendre la production à partir de la biomasse exigerait de nouvelles installations de transformation ainsi que de l'équipement de récolte et de transport pour acheminer la biomasse des régions agricoles aux

installations de production (NRC, 2013). Pour être économiques, les installations de transformation doivent être situées relativement près du site de production de la biomasse, même si certains biocarburants peuvent employer les réseaux de distribution qui existent déjà pour les produits pétroliers (NRC, 2013). Le volume de biomasse pouvant être utilisée de façon durable pour obtenir des carburants de transport sans nuire à l'environnement, aux systèmes agricoles et au prix des aliments est aussi un facteur à considérer, particulièrement pour l'éthanol de grain de maïs (AIE, 2011; Kahn Ribeiro *et al.*, 2012; Sims *et al.*, 2014). La production de biomasse peut avoir des effets négatifs, comme l'érosion du sol, l'usage de fortes quantités d'engrais azoté — une source d'émissions de gaz à effet de serre pouvant nuire aux étendues d'eau environnantes — et la consommation d'eau (Smil, 2010). Si ces impacts sont particulièrement importants pour l'éthanol à base de maïs, la production de biocarburant cellulosique pourrait aussi nuire à l'environnement et à l'agriculture. Les résidus de culture sont souvent employés en gestion agronomique pour recycler les nutriments dans le sol, réapprovisionner le sol en matières organiques et prévenir l'érosion du sol (Smil, 2010). Prélever ces résidus des fermes et les utiliser pour la production de carburant peut nuire à la durabilité agricole. Toutefois, les impacts environnementaux de la production de biocarburant peuvent être atténués par l'adoption de pratiques agricoles et forestières durables, ainsi que par la réglementation au besoin.

### Modèle urbain et infrastructure de transport

Les émissions du transport sont aussi fonction de l'environnement bâti et du modèle urbain. Dans les villes, les émissions par habitant rejetées par le transport diminuent à mesure que la densité de population augmente (Kennedy *et al.*, 2009; Rickwood et Searle, 2011; cité dans Sims *et al.*, 2014). De plus grandes densités de population peuvent réduire les besoins en déplacement et rendre le transport en commun et le transport motorisé plus viables. À l'inverse, les réseaux de transport en commun sont plus coûteux et difficiles à déployer dans les banlieues à faible densité (Sims *et al.*, 2014). Les villes diffèrent grandement dans le recours au transport non motorisé, qui est influencé par le modèle et l'aménagement urbains (Naess, 2006; Merriman, 2009; Kahn Ribeiro *et al.*, 2012). La proportion de déplacements effectués à pied, en vélo ou en transport en commun est au moins 50 % supérieure dans les villes d'Asie, d'Afrique, d'Amérique latine et d'Europe occidentale. Des cités comme Amsterdam, Copenhague, Melbourne, Bogotá et Curitiba ont démontré comment la planification et la coordination délibérées de l'affectation des terres peuvent favoriser un plus grand recours au transport non motorisé (Beatley, 2000; Bongardt *et al.*, 2010; Gehl, 2011; Kahn Ribeiro *et al.*, 2012). Les investissements dans les réseaux d'autobus rapide, de métro et

de train léger et de banlieue peuvent aussi encourager le transfert modal dans les zones urbaines et suburbaines, et provoquer une réduction des émissions (Kahn Ribeiro *et al.*, 2012).

L'infrastructure de transport régional et interurbain peut avoir un effet sur les émissions du réseau. Les investissements dans l'infrastructure autoroutière, par exemple, peuvent contribuer à la domination du transport routier sur les autres modes. Aux États-Unis, l'aménagement du réseau d'autoroutes inter-États a augmenté le nombre de kilomètres parcourus sur les routes, ce qui a contribué à l'étalement urbain et a favorisé la carence en réseaux ferroviaires de transport de voyageurs (Shalizi et Lecocq, 2009). Au Canada, l'aménagement d'une ligne ferroviaire à grande vitesse alimentée par de l'électricité à faibles émissions dans le corridor Toronto-Ottawa-Montréal pourrait réduire substantiellement les émissions sans accroître les temps de déplacement pour la plupart des trajets (Smil, 2014).

La durabilité du modèle urbain et de l'infrastructure de transport peut verrouiller certains réseaux de transport et les tendances en matière d'émissions qui les accompagnent durant plusieurs décennies (Shalizi et Lecocq, 2009). Les investissements actuellement effectués dans l'infrastructure et les décisions d'aménagement urbain sont donc cruciaux pour déterminer les futurs modes de transport. À moyen et long terme, les investissements dans l'infrastructure de transport et le développement et l'aménagement urbain axés sur le transport en commun, qui priorisent des communautés plus denses, le transport collectif et le transport non motorisé, pourraient faire baisser les émissions mondiales du transport de 20 à 50 % par rapport au niveau de 2010, si l'on présume que la plupart des véhicules continuent à être alimentés aux carburants fossiles (Sims *et al.*, 2014). Par contre, la réduction des émissions entraînée par le passage au transport en commun et la limitation des déplacements seront moindres ou nulles si les flottes de véhicules sont converties à des sources énergétiques à faibles émissions.

### 3.3 BÂTIMENT

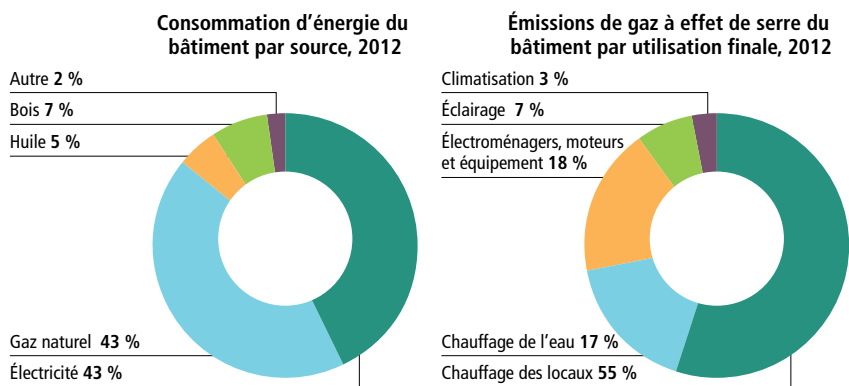
#### Principales constatations

- Le chauffage des locaux et de l'eau concentre la majorité de la consommation d'énergie et des émissions de dioxyde de carbone dans le secteur du bâtiment au Canada.
- Les bâtiments qui intègrent des principes tels que le chauffage solaire passif, une meilleure isolation et l'utilisation de thermopompes à air et à eau et de pompes géothermiques peuvent réduire la demande en chauffage et en climatisation de 60 à 90 % par rapport aux édifices conventionnels.
- Grâce aux considérables gains d'efficacité que cela engendre, il peut être économiquement viable de convertir les bâtiments à l'électricité à faibles émissions pour répondre aux autres besoins en énergie, ce qui entraînera une substantielle réduction des émissions dans ce secteur.
- Les systèmes énergétiques de quartier à faibles émissions alimentés par de l'énergie renouvelable et par la cogénération peuvent aussi réduire les émissions.
- Les gouvernements peuvent encourager la réduction des émissions grâce à des codes du bâtiment, à des normes d'efficacité énergétique, au renforcement de la capacité et à l'aménagement urbain.

En 2012, les édifices résidentiels, commerciaux et institutionnels (ce qu'on appelle collectivement le *secteur du bâtiment*) étaient responsables d'environ 29 % de la consommation d'énergie au Canada et de presque un quart des émissions de gaz à effet de serre (y compris des émissions indirectes de la production d'électricité) (RNCan, 2014h). Le secteur du bâtiment compte principalement sur l'électricité et sur le gaz naturel pour répondre à ses besoins énergétiques (voir la figure 3.4). Par conséquent, son profil d'émissions varie selon l'intensité carbonique de l'électricité dans la région. La majeure partie la consommation énergétique (et des émissions) est due au chauffage des locaux, mais le chauffage de l'eau est également une importante source de demande, tout comme les électroménagers, les moteurs et l'équipement (voir la figure 3.4). Le secteur du bâtiment se caractérise par une relative stabilité de la consommation d'énergie et des émissions de gaz effet de serre (RNCan, 2014h) et par un faible taux de renouvellement du parc.

Dans ce secteur, il est possible d'apporter des changements afin de réduire les émissions à divers niveaux, du mode urbain à l'enveloppe des édifices, en passant par les électroménagers et les appareils personnels (Ürge-Vorsatz *et al.*, 2012). Dans son analyse, le comité d'experts est parti de l'hypothèse d'une électricité

à faibles émissions. Il a ensuite étudié les stratégies favorisant la réduction des émissions par des gains d'efficacité et la transition de combustible. L'analyse se concentre sur l'énergie utilisée pour le chauffage, puisque le chauffage des locaux et de l'eau représente 72 % des émissions de dioxyde de carbone du secteur et que dans la plupart des régions du pays, il est assuré au moyen de combustibles fossiles.



Source de données : RNCAN, 2014h

Figure 3.4

### Consommation d'énergie du bâtiment par source et émissions de gaz à effet de serre par utilisation finale, 2012

Le secteur du bâtiment emploie deux sources principales d'énergie : le gaz naturel et l'électricité. La catégorie *Huile* comprend le mazout de chauffage, le mazout léger, le kérosène et le mazout lourd. La catégorie *Autre* comprend le charbon et le propane. La majorité des émissions de gaz à effet de serre du secteur du bâtiment (émissions d'électricité connexes comprises) sont dues au chauffage des locaux. Le chauffage de l'eau et les électroménagers, les moteurs et l'équipement sont aussi d'importantes sources d'émissions. Les émissions en amont issues de la production de combustibles ne servant pas à produire de l'électricité sont rapportées comme des émissions industrielles et donc exclues. Les émissions de gaz à effet de serre comprennent les émissions découlant de la consommation d'électricité produite par des centrales à combustible fossile et d'autres sources d'énergie.

#### 3.3.1 Amélioration de l'efficacité des édifices

L'amélioration de l'efficacité énergétique, notamment dans le domaine du chauffage des locaux et de l'eau, des électroménagers et de l'éclairage, a grandement réduit la demande énergétique des édifices (RNCAN, 2013)<sup>24</sup>.

24 Comme dans d'autres secteurs d'utilisation finale, les gains d'efficacité électrique ont entraîné la réduction des émissions dans des domaines où l'électricité est produite à partir de sources fortement émettrices, telles que le charbon, mais pas dans les domaines où elle est tirée d'énergies renouvelables, telles que l'hydroélectricité.

Cependant, ces gains sont neutralisés par de nombreux autres facteurs qui augmentent la demande, comme la croissance démographique, l'agrandissement de la superficie des résidences et des espaces commerciaux et le recours aux appareils électroniques personnels et autres équipements (RNCAN, 2013).

La conception améliorée des bâtiments est une stratégie essentielle pour réduire les émissions à l'avenir. Il est désormais possible de concevoir des édifices nécessitant de 60 à 90 % moins d'énergie pour le chauffage et la climatisation que les bâtiments traditionnels (Ürge-Vorsatz *et al.*, 2012). De plus, les économies d'énergie réalisées durant l'exploitation de ces édifices peuvent compenser le surcoût de construction. Les principes de la conception écoénergétique sont non seulement applicables aux nouveaux bâtiments, mais ils peuvent également l'être pour diminuer la consommation d'énergie dans au moins la moitié des constructions existantes (Ürge-Vorsatz *et al.*, 2012). Le comité d'expert conclut que ce sont les édifices écoénergétiques faisant appel au chauffage solaire passif, à une meilleure isolation, à des thermopompes à air et à eau et à des pompes géothermiques qui offrent le plus de possibilités de réduction importante des émissions dans le secteur du bâtiment.

- *Chauffage solaire passif.* Le chauffage solaire passif peut procurer d'énormes économies d'énergie en maximisant l'utilisation de la chaleur du soleil durant la saison froide et en la minimisant durant la saison chaude. Pour cela, les édifices sont dotés de fenêtres à auvent et sont orientés de façon particulière et munis d'une masse thermique (p. ex. un mur de pierre) pour absorber la chaleur (DOE, 2013a). La norme Passivhaus est une norme extrêmement draconienne de conception des habitations qui peut réduire les besoins en chauffage jusqu'à 1/25<sup>e</sup> de ce qu'ils sont dans les édifices traditionnels et donc exiger très peu d'énergie autre que le soleil pour maintenir une température confortable à l'intérieur (Harvey, 2009). On estime que le coût d'une maison conforme à cette norme n'est que de 5 à 16 % supérieur à celui d'un bâtiment classique, certains édifices commerciaux pouvant même coûter moins cher à la construction parce qu'ils nécessitent des systèmes mécaniques et électriques de plus faibles dimensions (Harvey, 2009; Ürge-Vorsatz *et al.*, 2012; Lucon *et al.*, 2014).
- *Meilleure isolation.* Dans les climats froids, colmater les fuites d'air, recourir à l'isolation et installer des fenêtres à haute efficacité peut réduire les besoins en énergie pour le chauffage jusqu'à un quart à un dixième de ce qu'ils sont dans les habitations traditionnelles (Ürge-Vorsatz *et al.*, 2012).
- *Thermopompes.* Les pompes géothermiques et les thermopompes à air et à eau (p. ex. alimentées par un lac ou une rivière) peuvent être employées comme source de chaleur latente pour le chauffage des locaux et de l'eau, et même pour la climatisation. Ces systèmes peuvent remplacer les formes de chauffage rejetant plus de CO<sub>2</sub>, comme les appareils au mazout, au gaz naturel et à l'électricité. Les thermopompes rejettent moins de CO<sub>2</sub> quand

l'électricité servant à les alimenter provient d'une source non émettrice. Ressources naturelles Canada estime qu'une pompe géothermique offre des économies de coût de 65 % par rapport à une chaudière électrique (RNCAN, 2004). Dans les édifices bien isolés, les thermopompes peuvent fonctionner quand les sources d'électricité intermittentes, comme l'éolien et le solaire, sont disponibles et réduire encore le profil d'émission (Harvey, 2009).

Les systèmes énergétiques de quartier reposant sur la cogénération de chaleur et d'électricité constituent une autre solution pour réduire les émissions de dioxyde de carbone produites par le chauffage dans les bâtiments conventionnels. Ces systèmes utilisent la chaleur provenant de la production d'électricité et la distribuent sous forme de vapeur ou d'eau chaude par le biais d'un réseau de chauffage communautaire. Cependant, quand les bâtiments sont déjà extrêmement efficaces, les systèmes énergétiques de quartier peuvent ne pas se révéler économiques en raison des coûts d'infrastructure et d'entretien (Lucon *et al.*, 2014). La cogénération convient particulièrement au secteur du bâtiment en raison de la faible température de la chaleur requise pour les besoins en chauffage des locaux et de l'eau (par rapport aux besoins industriels). Ürge-Vorsatz *et al.* (2012) notent que « l'efficacité du système est maximisée si la chaleur fournie par cogénération d'électricité est la plus basse possible, car cela minimise la baisse d'électricité produite consécutive au détournement de chaleur utile de la turbine à vapeur, maximise la fraction de chaleur résiduelle employée et minimise les pertes de chaleur pendant la distribution » [traduction libre]. Plusieurs systèmes de chauffage de quartier à cogénération ont été aménagés au Canada, principalement pour les édifices commerciaux et institutionnels. En Ontario, la centrale de cogénération de London et la centrale de cogénération de l'hôpital régional de Sudbury utilisent toutes deux du gaz naturel comme source d'énergie pour fournir de l'électricité au réseau ainsi que de la vapeur pour le chauffage des locaux et la climatisation des édifices avoisinants (IESO, s.d.a, s.d.b). Cependant, il y a des limites à la réduction des émissions pouvant être obtenue par cogénération lorsque du gaz naturel ou d'autres combustibles fossiles sont utilisés.

### 3.3.2 Substitution interénergétique dans les édifices

Le chauffage des locaux est responsable de 55 % des émissions de dioxyde de carbone du bâtiment (RNCAN, 2014h). Le recours à l'électricité à faibles émissions comme source de chauffage pourrait assurer une substantielle décarbonisation du secteur. Dans la majeure partie du pays, le bâtiment emploie le gaz naturel (ou le mazout) plutôt que l'électricité pour des raisons économiques<sup>25</sup>. Les résultats de la comparaison des coûts des options de

---

25 Le Québec est une exception. En raison de son bas coût, l'hydroélectricité y est largement utilisée comme source de chauffage des habitations (Hydro-Québec, s.d.a, 2014; RNCAN, 2014h).

chauffage varient considérablement selon le contexte et dépendent du prix des combustibles, de la technologie utilisée (et son efficacité), de l'ampleur de la demande et d'autres facteurs. En général, étant donné les différences de coût et les énormes quantités d'électricité qui seraient nécessaires pour fournir la chaleur au moyen des technologies classiques, l'électrification ne devrait pouvoir se faire qu'en parallèle avec des améliorations notables de l'enveloppe des bâtiments afin de réduire les besoins en chauffage, voire également avec la hausse de l'utilisation des thermopompes (Lucon *et al.*, 2014). Dans les édifices qui satisfont la norme Passivhaus, la majeure partie de la chaleur requise provient des gens, de l'éclairage et des électroménagers ainsi que de l'énergie solaire passive. Ces constructions ne réclament donc que faiblement l'aide d'un système de chauffage d'appoint (Harvey, 2009).

D'autres solutions énergétiques non émettrices, comme le thermosolaire et la biomasse, équipent certains bâtiments. Les systèmes thermosolaires utilisent l'énergie du soleil pour chauffer un fluide qui circule dans la maison pour assurer le chauffage des locaux et de l'eau. Ces systèmes peuvent compléter les appareils de chauffage classiques et sont particulièrement efficaces sur les toits bien orientés dans les endroits ensoleillés. La biomasse, principalement celle provenant du bois, est également largement utilisée pour le chauffage des maisons, en particulier en zone rurale. Elle est généralement considérée comme une source d'énergie à faibles émissions et peut être économique dans certaines situations. Cependant, comme source de chauffage, elle comporte quelques inconvénients, tels que le travail qu'elle requiert et son impact sur la qualité de l'air local, bien que ce dernier puisse être atténué par les dispositifs de chauffages modernes à faibles émissions offerts dans le commerce.

Les systèmes énergétiques de quartier peuvent soutenir la substitution interénergétique quand ils emploient des combustibles ou des déchets à faibles émissions. Ils sont particulièrement rentables dans les zones densément peuplées ou dans les zones où les bâtiments sont situés à proximité d'industries. À Vancouver, la Southeast False Creek Neighbourhood Energy Utility a implanté son système énergétique de quartier au même endroit qu'une station municipale de pompage des eaux usées et a installé une thermopompe utilisant la chaleur résiduelle des conduites d'eaux usées pour chauffer de l'eau, laquelle est ensuite envoyée dans les édifices locaux pour chauffer les locaux et l'eau de ces bâtiments (Ville de Vancouver, s.d.). Le système est intégré avec des systèmes thermosolaires sur certains toits pour hausser encore la température de l'eau. Des chaudières au gaz naturel fournissent un supplément de chaleur les journées très froides (Ville de Vancouver, s.d.). Ce dispositif produit suffisamment d'énergie pour fournir chauffage et eau chaude à 3,5 millions de pieds carrés de locaux (Ville

de Vancouver, 2014). À Toronto, de l'eau froide du lac Ontario est utilisée pour refroidir un système de climatisation de quartier en boucle fermée desservant de nombreux bâtiments commerciaux du centre-ville en été (Enwave, 2013).

### 3.3.3 Considérations systémiques relatives au bâtiment

L'un des obstacles majeurs à l'atténuation des émissions des édifices est le coût élevé de l'électricité comme source de chaleur par rapport au gaz naturel dans de nombreuses situations. Le problème peut être résolu principalement par l'amélioration notable de l'efficacité afin de réduire substantiellement la demande énergétique et d'alléger l'effet du coût par unité plus élevé de l'électricité. Ce compromis met en lumière l'importance de coupler l'efficacité et la transition de combustible dans le secteur du bâtiment.

Dans ce secteur interviennent de nombreux décideurs qui ne sont pas toujours des experts de la gestion énergétique et il peut être chronophage, complexe et coûteux de déterminer les stratégies les plus bénéfiques pour réduire les pertes d'énergie. Dans les ententes propriétaire-locataire où la partie qui fait les choix énergétiques n'est pas la même que celle qui assume les coûts, les encouragements à réaliser des investissements initiaux peuvent être limités (Gillingham et Palmer, 2014). Harvey (2009) souligne l'importance de la conception intégrée qui regroupe toutes les personnes participant à la conception des bâtiments, relevant que « le principal obstacle à la réalisation d'importantes économies d'énergie dans les nouveaux édifices est le manque de connaissances et de motivation au sein des métiers de la conception » [traduction libre]. Les gouvernements peuvent résoudre ces problèmes au moyen de codes du bâtiment, de stratégies de participation communautaire, du renforcement de la capacité, de normes d'efficacité énergétique et de projets pilotes (voir le chapitre 4) (Harvey, 2009; Lucon *et al.*, 2014). Les transitions dans le secteur du bâtiment ne conduiront pas à de grandes réductions des émissions à court terme, mais des mesures immédiates peuvent éviter le verrouillage avec de l'infrastructure et du matériel inefficaces et améliorer l'évolution à long terme des émissions (Lucon *et al.*, 2014).

Les gouvernements font des choix structuraux qui freinent ou favorisent les réductions des émissions dans le secteur du bâtiment. Par exemple, les nouveaux lotissements de banlieue faiblement denses ou composés d'habitations peu écoénergétiques peuvent figer un parc immobilier à fortes émissions. À l'inverse, la densification urbaine peut réduire la consommation d'énergie, car des logements contigus exigent moins d'énergie par occupant. Comme l'examine la section 3.2, la densification peut apporter des avantages conjoints en réduisant les émissions du transport de personnes, puisque les gens vivent plus près des services, du travail et du transport collectif. Une étude menée

à Toronto a révélé que les émissions de gaz à effet de serre par habitant en banlieue sont plus de deux fois plus élevées que dans le cœur urbain densément peuplé, ce qui traduit des différences de mode de vie (particulièrement en ce qui concerne le transport) et la superficie habitable occupée (Norman *et al.*, 2006). Les quartiers à forte densité de population peuvent être rendus plus attrayants quand ils sont à usage mixte, c'est-à-dire qu'ils se trouvent à proximité du travail des services et du transport en commun.

### 3.4 INDUSTRIE

#### Principales constatations

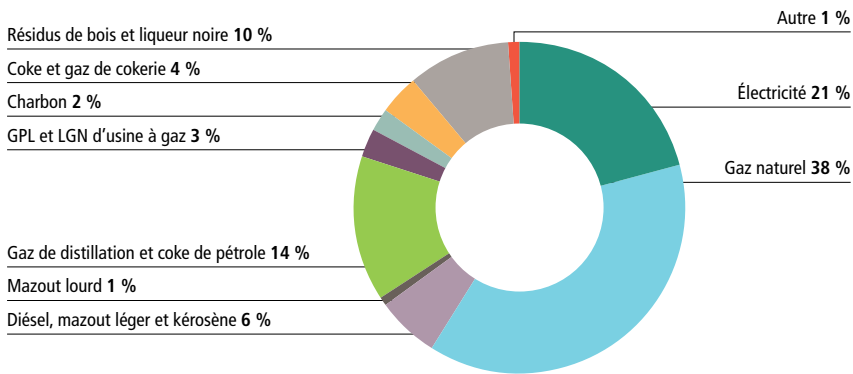
- La transition vers un système énergétique à faibles émissions nécessitera une réduction substantielle des émissions dans le secteur pétrolier et gazier et dans de nombreux autres secteurs d'activité industriels. La principale difficulté consiste souvent à déterminer les moyens faiblement émetteurs et économiques de produire de fortes chaleurs, opération qui représente 75 % de la demande énergétique industrielle.
- L'industrie pourrait améliorer son efficacité énergétique par du matériel et un entretien améliorés, l'intégration de procédés réduisant la demande et la diminution de la consommation d'énergie dans la transformation des matières.
- Un recours accru à l'électricité à faibles émissions peut entraîner d'autres réductions des émissions, et la biomasse pourrait également être une importante option de substitution interénergétique pour certaines industries. Le CSC est particulièrement intéressant pour les industries qui produisent des vapeurs concentrées de dioxyde de carbone et se trouvent à proximité de sites de stockage géologique. Surveiller et colmater les fuites dans les réseaux de production et de distribution de gaz naturel et réduire le rejet à l'air libre et le torchage pourrait diminuer les émissions fugitives dans le secteur pétrolier et gazier.
- La sensibilité aux prix et l'hétérogénéité de l'industrie mettent en lumière les avantages d'une politique de tarification uniforme du carbone. Les gouvernements peuvent aussi encourager la réduction des émissions en améliorant l'accès à l'électricité à faibles émissions, en aménageant une infrastructure de soutien aux technologies énergétiques à faibles émissions, en promouvant la recherche collaborative et en communiquant les pratiques et les technologies innovantes.

En 2012, l'industrie était responsable de 38 % de la consommation d'énergie au Canada et de 34 % des émissions de gaz à effet de serre (RNCan, 2014h). L'extraction houillère et le pétrole et le gaz naturel en amont sont les activités industrielles les plus gourmandes en énergie, suivis par les pâtes et papiers, la fabrication (p. ex. aliments, textile, automobile) et le raffinage du pétrole.

L'industrie utilise l'énergie à deux fins principales : pour faire tourner des moteurs et comme source de chaleur. Les moteurs actionnent généralement des pompes, des compresseurs et d'autres dispositifs mécaniques fonctionnant à l'électricité. Mais au Canada, 75 % de la consommation énergétique industrielle sert à la production de chaleur (ONÉ, 2010). La chaleur est largement utilisée pour transformer les matières premières en matériau utilisable (p. ex. des arbres en papier) et elle est très majoritairement produite au moyen de combustibles fossiles. Résultat, la principale difficulté de la réduction des émissions dans l'industrie consiste à déterminer les moyens faiblement émetteurs et économiques de produire de fortes quantités de chaleur.

Le type d'énergie employé dans l'industrie diffère de la combinaison énergétique généralement mise en œuvre au Canada. L'industrie s'appuie lourdement sur le gaz naturel et sur l'électricité, mais elle utilise aussi de forts volumes de gaz de distillation et de coke de pétrole, ainsi que les déchets de bois et la liqueur noire. La figure 3.5 illustre cette combinaison énergétique et la figure 3.6 présente la ventilation des émissions de gaz à effet de serre entre les secteurs d'activité. Comme différents secteurs d'activité utilisent différentes sources d'énergie, la proportion d'émissions de chaque secteur ne correspond pas à sa part de la consommation d'énergie. Par exemple, l'usage intensif de gaz naturel, de gaz de distillation et de coke de pétrole, qui rejettent du dioxyde de carbone, dans l'extraction houillère et le pétrole et le gaz naturel en amont fait que ces secteurs ont un profil d'émissions particulièrement élevé, alors qu'il est bas dans l'industrie des pâtes et papiers en raison du fort recours à la biomasse.

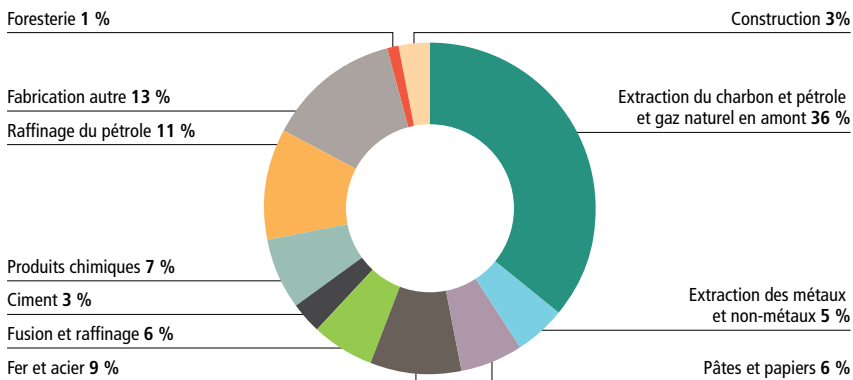
L'industrie pétrolière et gazière canadienne, et en particulier les sables bitumineux, est largement reconnue comme un important acteur économique du pays, mais aussi comme une source croissante d'émissions de dioxyde de carbone (bien que la croissance future de l'industrie soit liée au prix du pétrole). La plupart des émissions industrielles ont été stables ou ont diminué ces dernières décennies, mais le secteur des hydrocarbures a constitué une importante exception à la règle. Les émissions de la production pétrolière et gazière canadienne ont cru de 63 % entre 1990 et 2012 (Environnement Canada, 2015c), principalement à cause de la hausse de la production de sables bitumineux. D'après les prévisions de production de 2014, les émissions de gaz à effet de serre des sables bitumineux pourraient être en 2025 le double de ce qu'elles étaient en 2013 (CAC, 2015b). Le rythme de la croissance des émissions dépendra toutefois en partie des prix mondiaux du pétrole et de l'accès à de nouveaux marchés. Les émissions des sables bitumineux sont la conséquence de l'extraction à ciel ouvert, de la production in situ et de la valorisation du bitume, et les changements de technologie et de procédé susceptibles de réduire les émissions varient selon l'activité.



Source de données : RNCan, 2014h

**Figure 3.5****Demande en énergie industrielle par source énergétique, 2012**

Le gaz naturel est la plus grande source d'énergie de l'industrie, suivie par l'électricité, puis le gaz de distillation et le coke de pétrole. GPL signifie « gaz de pétrole liquéfié » et LGN « liquides de gaz naturel ».



Source de données : RNCan, 2014h

**Figure 3.6****Émissions de gaz à effet de serre par secteur d'activité, 2012**

L'extraction de charbon et le pétrole et le gaz naturel en amont sont les principaux responsables des émissions de l'industrie (36 %), suivis par la fabrication et le raffinage de pétrole. Les émissions comprennent les rejets issus de la consommation d'électricité produite par les centrales à combustibles fossiles. Les données excluent les émissions des procédés industriels. Les émissions fugitives, y compris le rejet à l'air libre et le torchage du gaz naturel, sont aussi exclues. Leur inclusion aurait augmenté la proportion des émissions du pétrole et du gaz naturel en amont. Selon le rapport d'inventaire national d'Environnement Canada, les émissions fugitives représentaient 39 % des émissions du secteur du pétrole et du gaz naturel en amont en 2013 (Environnement Canada, 2015c).

Comme les sources et la consommation d'énergie varient d'une industrie à l'autre, il n'existe pas de solution unique, et les émissions doivent diminuer substantiellement dans le domaine pétrolier et gazier et dans de nombreuses autres activités industrielles. Les données probantes mettent en lumière certaines solutions globales pour réduire ces émissions : l'efficacité énergétique, le CSC et la substitution interénergétique. Cette section présente ces solutions et expose quelques considérations systémiques connexes. Pour mieux illustrer ces idées, chaque sous-section approfondit les conclusions du rapport du comité d'experts sur la capacité des technologies nouvelles et émergentes de réduire les incidences environnementales de l'exploitation des sables bitumineux (comité d'experts sur les sables bitumineux) du CAC (encadrés 3.4 à 3.7). L'examen se concentre sur les procédés d'extraction in situ, puisqu'il s'agit de la plus grande source d'émissions et d'une source croissante, mais étudie également les procédés de valorisation.

### 3.4.1 Amélioration de l'efficacité industrielle

L'énergie représente une grosse partie des coûts globaux de l'industrie, de nombreuses méthodes classiques visant à améliorer l'efficacité énergétique ont donc déjà été appliquées dans le but de l'économiser (ONUUDI, 2010). Si des politiques de réduction des émissions plus strictes étaient introduites, plusieurs options générales d'amélioration de l'efficacité pourraient mener à de nouvelles réductions (pour en savoir plus, voir Brown *et al.* (2012), Banerjee *et al.* (2012), AIE (2009a)).

#### Amélioration du matériel et de l'entretien

On estime qu'il est possible de réaliser des gains d'efficacité de 20 à 25 % pour les moteurs et de 10 à 15 % pour les systèmes de production de vapeur utilisés dans les applications à forte chaleur (AIE, 2007). Pour les moteurs, ces gains peuvent être obtenus à l'aide de nombreuses stratégies, notamment par une meilleure adéquation entre la capacité du moteur et les besoins du système, par l'usage d'entraînements à vitesse variable qui ajustent continuellement la puissance du moteur à la demande et par l'amélioration de l'entretien (AIE, 2007; Brown *et al.*, 2012). Pour les systèmes de production de vapeur, l'augmentation de l'efficacité peut être réalisée au moyen de l'isolation des conduites, de la mise en correspondance de l'offre à la demande et de l'amélioration de l'entretien (AIE, 2007).

## Réduction de la consommation d'énergie dans la transformation industrielle des matériaux

À l'échelle mondiale, la majorité des émissions industrielles sont rejetées durant la transformation des ressources naturelles en matériau de production (p. ex. transformation du fer en acier) (Fishedick *et al.*, 2014; GIEC, 2014b). Dans certains cas, il peut être possible d'utiliser de tout nouveaux procédés de transformation réclamant peu ou pas d'énergie. Par exemple, dans la production de papier, l'ajout d'additifs chimiques pourrait réduire l'énorme quantité de chaleur servant à sécher le papier (Laurijssen *et al.*, 2010). Cependant, l'utilisation accrue de produits chimiques dans cette opération peut soulever des inquiétudes environnementales, particulièrement au sujet de la pollution de l'eau. Les procédés novateurs peuvent être une source importante d'économie d'énergie dans le secteur des produits chimiques et pétrochimiques (AIE, 2009a). L'utilisation améliorée des catalyseurs pour faciliter les réactions chimiques peut rendre plus efficaces les méthodes actuelles de transformation et permettre l'emploi de procédés de substitution ou moins énergivores. Une autre solution prometteuse est le recours à des membranes pour séparer les éléments chimiques (AIE, 2009a).

## Intégration des procédés pour réduire la demande

La cogénération de chaleur et d'électricité convient bien aux installations qui ont de gros besoins des deux, notamment dans le domaine des pâtes et papiers, des produits chimiques et pétrochimiques et du raffinage (ONÉ, 2010). Elle exploite généralement la combustion du gaz naturel, mais peut employer d'autres énergies, comme le solaire concentré (qui utilise des miroirs pour concentrer les rayons solaires) ou la biomasse. Les avantages en matière de réduction des émissions de la cogénération dépendent de l'efficacité des technologies conventionnelles. Dans l'industrie, les chaudières possèdent une efficacité de 80 % ou plus et il est difficile de l'améliorer (CIEEDAC, 2014). Par conséquent, les bienfaits que la cogénération peut apporter en matière d'émissions peuvent être relativement modestes.

*Global Energy Assessment* conclut que « la seule manière de réduire la consommation d'énergie dans l'industrie autrement que légèrement est d'utiliser bien moins de produits industriels et d'accroître considérablement la réutilisation des produits, la rénovation, la remise à neuf et le recyclage » [traduction libre] (Banerjee *et al.*, 2012). L'emploi efficace des matières premières dans la conception et la production et un usage plus intensif des produits pourraient réduire la demande. Par exemple, 26 % de l'acier liquide est gaspillé en chutes de fabrication; éliminer ces déchets pourrait abaisser les émissions de dioxyde de carbone de ce secteur de 16 % (Milford *et al.*, 2011). De même, utiliser de l'aluminium recyclé ne nécessite que 5 à 8 % de l'énergie requise pour produire

de l'aluminium neuf à partir du minerai (AIE, 2009a). Dans certains cas, il est aussi possible de remplacer des matériaux énergivores par des matériaux procurant le même service avec moins d'énergie. Par exemple, un plus grand recours au bois dans la construction pourrait réduire la demande d'acier et de ciment (Brown *et al.*, 2012). Les secteurs industriels intégrés peuvent parfois atteindre une meilleure efficacité systémique que des entreprises seules, grâce à la redistribution de l'énergie et à l'utilisation des déchets d'une entreprise comme intrants du procédé de production d'une autre (Ehrenfeld et Gertler, 1997). Les secteurs industriels intégrés suivent une approche écologique de l'industrie pour « passer d'une production linéaire à une utilisation en boucle fermée des matières et de l'énergie » [traduction libre] (Ehrenfeld et Gertler, 1997).

### 3.4.2 Le captage et le stockage du carbone dans l'industrie

Il est possible de continuer à utiliser les combustibles fossiles pour les opérations nécessitant de fortes quantités de chaleur tout en réalisant d'importantes réductions des émissions de dioxyde de carbone si ces émissions sont capturées et stockées (comme le décrit la section 3.1.2). Certains procédés industriels sont particulièrement adaptés au CSC, en raison de leur proximité de sites de stockage potentiels et du fait qu'ils rejettent des flux d'émissions de dioxyde de carbone fortement concentrés à certains points de production. Le ciment en est un bon exemple : « 50 % des émissions de CO<sub>2</sub> découlent de la calcination du calcaire. Capturer et séquestrer le CO<sub>2</sub> est la seule solution pour éviter qu'il ne soit rejeté dans l'atmosphère » [traduction libre] (Brown *et al.*, 2012). En 2013, cinq installations de CSC d'envergure étaient en service, qui séquestraient les émissions produites par des procédés industriels dont les flux de rejet de dioxyde de carbone étaient relativement purs (et donc peu coûteux) (Bruckner *et al.*, 2014). Ces cinq installations ont collectivement stocké plus de 30 mégatonnes (Mt) de dioxyde de carbone (Bruckner *et al.*, 2014). Un inventaire des projets actuels révèle que c'est dans la transformation du gaz qu'on retrouve le plus souvent le CSC, mais ce procédé est aussi utilisé dans la gazéification du charbon et dans la production d'éthanol et d'hydrogène (MIT, 2015). Le dioxyde de carbone capturé est soit utilisé pour la récupération assistée du pétrole soit injecté dans des réservoirs salins (MIT, 2015).

### 3.4.3 Substitution interénergétique dans l'industrie

Plusieurs possibilités de substitution interénergétique pourraient conduire à la réduction des émissions (voir Banerjee *et al.* (2012), Brown *et al.* (2012), GIEC (2014b)). Cependant, la rentabilité des diverses sources d'énergie varie selon les caractéristiques du secteur d'activité et les besoins des utilisateurs. Les options les mieux adaptées à la transformation sont l'accroissement de l'utilisation de l'électricité et celle de la biomasse.

### Encadré 3.4

#### Les sables bitumineux dans le détail : analyse de l'efficacité énergétique

La recherche met en lumière plusieurs possibilités de gains d'efficacité pour l'extraction in situ et la valorisation du bitume, notamment par l'utilisation de tubes isolés et de solvants et la cogénération.

Les procédés d'extraction in situ recourent traditionnellement à la vapeur pour séparer le bitume des matériaux environnants sous la terre, puis se servent de pompes pour remonter le bitume à la surface. Les tubes isolés sous vide réduisent les pertes de chaleur quand la vapeur est transférée de la surface vers le puits. Selon la Canada's Oil Sands Innovation Alliance (COSIA), l'usage de tels tubes peut réduire le temps nécessaire pour préchauffer un puits avant que le bitume commence à s'écouler de 3 à 4 mois à 75 jours (COSIA, s.d.b).

La cogénération a également permis d'importantes augmentations de l'efficacité énergétique dans l'industrie des sables bitumineux (Moorhouse et Peachey, 2007). Elle est particulièrement avantageuse quand l'extraction et la valorisation se déroulent au même endroit, ce qui crée une demande de chaleur et d'électricité. La cogénération constitue également une solution pour les installations qui requièrent de la chaleur et qui possèdent l'infrastructure pour vendre les excédents d'électricité au réseau. L'Alberta peut réduire les émissions de gaz à effet de serre produites par son réseau électrique en faisant en sorte que l'électricité issue des centrales de cogénération au gaz naturel réponde à la demande qui serait sinon satisfaite au moyen de centrales au charbon (Moorhouse et Peachey, 2007).

Des recherches sont en cours pour concevoir des procédés d'extraction in situ employant des solvants pour compléter ou remplacer la vapeur pour la libération du bitume. L'extraction assistée par des solvants (un hybride de l'extraction par vapeur et par solvants) pourrait abaisser les émissions de 15 à 35 % et être déployée à court terme. Grâce aux procédés à base de solvants n'exigeant pas l'utilisation de vapeur, qui en sont au stade du projet pilote, les réductions pourraient atteindre 90 % grâce à l'élimination du recours à la vapeur et à la diminution du besoin de valorisation après l'extraction (puisque les solvants pourraient participer à la valorisation du bitume sur place). Cette réduction pourrait atténuer les émissions d'ici à 2030 afin qu'elles se rapprochent de leur valeur moyenne dans l'extraction du pétrole brut aux États-Unis. L'utilisation de solvants pour l'extraction in situ soulève des inquiétudes

*suite à la page suivante*

quant à la possibilité de contamination des eaux souterraines et pourrait produire des émissions fugitives, mais elle pourrait également réduire la pollution de l'air et la consommation d'eau des sables bitumineux (CAC, 2015b). Le comité d'experts sur les sables bitumineux a constaté que l'extraction à base de solvants est un des procédés transformatifs les plus prometteurs pour ce qui est de la réduction des émissions des sables bitumineux, même s'il est peu probable qu'elle soit mise en application à court terme (CAC, 2015b).

### *Encadré 3.5*

#### **Les sables bitumineux dans le détail : analyse du CSC**

Le comité d'experts sur les sables bitumineux a constaté qu'avec la technologie actuelle, le CSC est rentable pour la valorisation du bitume, contrairement à l'extraction (CAC, 2015b), principalement parce que la valorisation peut produire un flux concentré de dioxyde de carbone à capter. L'Alberta dispose également d'une capacité de stockage du dioxyde de carbone accessible dans les réservoirs de gaz exploités et dans des aquifères salins. Le comité a observé que « les considérations pratiques liées à la modernisation des usines de valorisation existantes [aux fins du CSC] risquent de limiter le captage du carbone à entre 20 et 40 % des émissions ». À moyen terme, c'est ce procédé qui offre les plus grandes promesses de réduction des émissions de la valorisation (CAC, 2015b). La première application commerciale du CSC dans les sables bitumineux est le projet Quest CCS, qui captera plus d'un million de tonnes de dioxyde de carbone par an à partir de l'usine de valorisation Scotford de Shell et l'injectera dans le sol. L'exploitation du projet pourrait commencer à la fin de 2015.

## **Électricité**

Le recours accru à l'électricité peut réduire les émissions si l'électricité provient elle-même d'une source à faibles émissions. L'électricité est déjà largement utilisée dans l'industrie pour alimenter les moteurs (ONÉ, 2010) et comme source de chaleur dans certaines opérations. Par exemple, les fours électriques à arc sont employés dans le secteur de la fabrication de fer et d'acier pour recycler la mitraille d'acier (GIEC, 2014b). Il existe plusieurs usines d'acier à fours électriques à arc en exploitation au Canada; cette technique de production requiert moins de la moitié de l'énergie nécessaire pour produire de l'acier à partir de minerai de fer (PEEIC et ACPA, 2007). Le secteur de l'aluminium repose fortement sur l'électricité. La fusion utilise le courant électrique pour transformer l'alumine en aluminium; les 10 alumineries du Québec

consomment l'équivalent de 14 % de la puissance installée d'Hydro-Québec et le secteur de l'aluminium produit environ la moitié de l'électricité qu'il consomme (AAC, 2012).

### Biomasse

La biomasse est une autre source d'énergie à faibles émissions pouvant être utilisée pour produire de fortes chaleurs. L'industrie des pâtes et papiers tire déjà approximativement 60 % de son énergie des résidus de la biomasse (ONÉ, 2010). Les déchets peuvent aussi être utilisés comme combustible dans certaines opérations. Brown *et al.* (2012) notent que « les fours à ciment conviennent particulièrement bien à l'incinération des déchets; la forte température de l'incinération, le milieu alcalin, le temps de séjour et la bonne combinaison de gaz et de produits font en sorte que les déchets sont éliminés en toute sécurité et avec un impact environnemental minime » [traduction libre].

#### *Encadré 3.6*

##### **Les sables bitumineux dans le détail : analyse de la substitution interénergétique**

Les sources d'électricité à faibles émissions pourraient servir à remplacer d'autres sources d'énergie dans plusieurs opérations concernant les sables bitumineux. L'hydroélectricité ou l'électricité d'origine géothermique ou tirée de la biomasse, plutôt que le gaz naturel, pourrait servir à produire la vapeur nécessaire à l'extraction in situ. Les centrales nucléaires modulaires pourraient aussi fournir la chaleur, la vapeur et l'électricité. Toutefois, ces solutions de substitution se heurtent à des obstacles de taille. Utiliser l'hydroélectricité dans les sables bitumineux exigerait de nouvelles lignes de transport, voire de nouvelles centrales hydroélectriques. L'usage de la géothermie pour produire de l'électricité dans les sables bitumineux a fait l'objet de très peu de tests, bien qu'il soit étudié en Saskatchewan, dans une région dont la géologie est semblable à celle de l'Athabasca. Les principaux freins à l'énergie nucléaire modulaire sont l'incertitude quant aux coûts et les inquiétudes de la population concernant la sécurité, le stockage des déchets et les impacts environnementaux. Aucune de ces sources énergétiques de substitution n'a de chance d'être déployée à grande échelle dans les sables bitumineux sans l'adoption d'une politique stricte d'atténuation des émissions et sans l'appui supplémentaire de l'industrie et du gouvernement.

### 3.4.4 Considérations systémiques concernant l'industrie

L'industrie est sensible au prix et réagit donc aux politiques qui limitent ou accroissent le coût des émissions. Le chapitre 4 examine les instruments politiques qui pourraient être déployés pour limiter les émissions industrielles à l'aide de règlements contraignants ou de signaux de prix. L'industrie est fortement hétérogène et les technologies utilisées et les choix énergétiques offerts sont extrêmement variables, même dans un même secteur d'activité. Cette variabilité souligne l'importance d'introduire un prix uniforme du carbone pour toute l'industrie ou de définir des méthodes réglementaires procurant aux entreprises la souplesse dans le choix des stratégies de réduction des émissions. Les gouvernements sont aussi en mesure de soutenir les transitions industrielles en intensifiant la production d'électricité à faibles émissions et en appuyant l'installation de canalisations de dioxyde de carbone. Si certains secteurs, en particulier celui du pétrole et du gaz, disposent de réservoirs de stockage du dioxyde de carbone sur place, d'autres pourraient intégrer le CSC s'ils disposaient de canalisations permettant d'acheminer le carbone capté vers des sites de stockage extérieurs. L'industrie pétrolière et gazière se heurte aussi au problème systémique majeur du contrôle des émissions fugitives (voir l'encadré 3.8).

#### *Encadré 3.7*

#### **Les sables bitumineux dans le détail : considérations systémiques**

Le comité sur les sables bitumineux a souligné l'importance d'une tarification du carbone pour stimuler la réduction des émissions de gaz à effet de serre, relevant que la faiblesse actuelle des prix du gaz naturel et du dioxyde de carbone n'encourage pas l'utilisation du CSC, des sources électriques à faibles émissions et des solvants. Par ailleurs, l'exploitation plus soutenue de la recherche scientifique et du transfert technologique pourrait aussi accroître encore la réduction des émissions. Le comité d'experts sur les sables bitumineux a constaté que la recherche collaborative entre l'industrie, les universités et les gouvernements peut être un outil précieux pour surmonter des défis complexes. La Canada's Oil Sands Innovation Alliance (COSIA), qui regroupe 13 producteurs de sables bitumineux, travaille à améliorer le rendement environnemental du secteur par l'innovation et la collaboration. Selon elle, « les entreprises membres ont partagé 777 technologies et innovations différentes qui ont coûté plus de 950 millions de dollars à développer » [traduction libre] depuis sa fondation en 2012 (COSIA, s.d.a). Le comité a également constaté que la réglementation peut stimuler l'innovation quand elle fixe un seuil de rendement environnemental. Enfin, certains projets ont été rendus possibles par l'appui gouvernemental au développement de l'infrastructure de CSC.

### Encadré 3.8

#### Émissions fugitives provenant des combustibles

Le rapport d'inventaire national d'Environnement Canada définit les émissions fugitives provenant des combustibles fossiles comme « [les] émissions volontaires ou accidentelles de gaz à effet de serre provenant de la production, du traitement, du transport, de l'entreposage et de la livraison de combustibles fossiles » (Environnement Canada, 2015c). Les émissions fugitives découlent des activités pétrolières et gazières, y compris du torchage du gaz naturel aux installations de forage, de fracturation, de production et de transformation, et des fuites des compresseurs, des vannes, des joints, des pipelines et des usines de transformation du gaz naturel. À un degré moindre, elles sont également la conséquence du rejet de méthane provenant de l'extraction houillère et des sables bitumineux.

À l'échelle mondiale, les estimations faites à partir des données satellitaires indiquent que plus de 139 milliards de mètres cubes de gaz sont torchés chaque année (Elvidge *et al.*, 2009). Ce volume équivaut à environ 5 % de la consommation mondiale de gaz naturel et produit l'équivalent d'environ 289 millions de tonnes de dioxyde de carbone (Johnson et Coderre, 2011). Pour la production de gaz naturel, des analyses récentes portent à croire que les émissions fugitives devraient s'élever à 2 à 3 % du gaz produit, les émissions se situant généralement entre les niveaux relevés pour la production de gaz conventionnel et de gaz de schiste (Bruckner *et al.*, 2014). Les estimations des émissions fugitives sont imprécises en raison de la grande difficulté à surveiller et à évaluer les émissions provenant des nombreuses sources disparates du secteur pétrolier et gazier (Picard, s.d.). On peut raisonnablement présumer que leurs quantités réelles sont bien plus élevées que les valeurs indiquées.

Les émissions fugitives ont contribué à environ 8 %, ou 61 Mt, des émissions de gaz à effet de serre canadiennes en 2013 (Environnement Canada, 2015c) — ce qui équivaut approximativement aux émissions de gaz à effet de serre produites par les sables bitumineux. La possible augmentation future de la production de gaz non conventionnel et de pétrole de schiste ou de réservoirs étanches au Canada entraînera une hausse des émissions fugitives, à moins que des mesures correctives soient prises. Les émissions fugitives peuvent être réduites grâce à la surveillance et au colmatage des fuites dans les réseaux de production et de distribution de gaz et au captage du gaz pendant la complétion des puits au lieu de sa mise à l'air libre ou de son torchage.

*suite à la page suivante*

Les gouvernements à de nombreux niveaux prennent actuellement des mesures pour atténuer les émissions fugitives. À l'échelle provinciale, le gouvernement de l'Alberta réglemente le torchage et la mise à l'air libre et établit des pratiques exemplaires en matière de détection et de réparation des fuites. Résultat, le rejet d'émissions fugitives par unité de production a chuté d'environ un quart entre 2000 et 2010 (Environnement Canada, 2015c). Le gouvernement fédéral a aussi annoncé des plans pour élaborer de nouveaux règlements sur la gestion des émissions fugitives. À l'échelle internationale, le Canada est un membre actif du Partenariat mondial pour la réduction des gaz torchés, un partenariat public-privé lancé en 2002 à l'initiative de la Banque mondiale. Ce partenariat rassemble « des représentants des gouvernements de pays producteurs de pétrole, de sociétés d'État, de grandes entreprises pétrolières internationales et de pays donateurs pour surmonter les obstacles mondiaux à la réduction du torchage des gaz connexe grâce au partage des pratiques exemplaires et à la mise sur pied de programmes propres aux pays » [traduction libre] (ONÉ *et al.*, 2008).

### 3.5 RÉSUMÉ

Dans tous les secteurs, les technologies et les sources d'énergie existantes pourraient collectivement engendrer des réductions majeures des émissions canadiennes provenant de la production d'énergie sur plusieurs décennies. Les précédents exercices de modélisation ont permis de déterminer des séries de mesures correspondant à celles décrites tout au long du chapitre, grâce auxquelles il serait possible de réduire ces émissions de 60 à 90 % :

- La modélisation visant à déterminer l'approche la moins coûteuse pour atteindre la cible du gouvernement fédéral, soit la réduction des émissions de 60 à 70 % par rapport au niveau de 2006 d'ici à 2050, cerne l'utilisation accrue du CSC, le plus grand recours aux biocarburants et aux véhicules hybrides, l'électrification et l'amélioration de l'efficacité énergétique comme principaux moyens à déployer pour atteindre la cible (TRNEE, 2009)<sup>26</sup>.
- Un exercice de modélisation plus récent a étudié les mesures requises pour réduire les émissions nationales de presque 90 % au-dessous du niveau de 2010 d'ici à 2050. Les principales stratégies comprennent une utilisation accrue des énergies renouvelables et de la biomasse, la substitution interénergétique pour obtenir une électricité et des biocarburants à faibles émissions et l'amélioration de l'efficacité énergétique (Bataille *et al.*, 2014).

26 L'exercice de modélisation s'est servi d'un point médian de 65 % pour la réduction, et 10 % de la réduction des émissions est atteinte par l'acquisition de crédits internationaux.

*Global Energy Assessment* a effectué d'intenses travaux de modélisation des cheminements présentant une probabilité supérieure à 50 % de limiter la hausse de température mondiale à 2 °C (soit une réduction de 30 à 70 % des émissions par rapport au niveau de 2000 d'ici à 2050) et a déterminé un ensemble similaire de stratégies pour atteindre ces résultats, notamment l'amélioration de l'efficacité, la croissance des énergies renouvelables et de la bioénergie, la décarbonisation du secteur de l'électricité et un plus grand recours aux véhicules électriques.

Selon le comité d'experts, aucun obstacle purement technologique n'empêche le Canada de passer à un système énergétique à faibles émissions. Cependant, en raison des coûts supérieurs des procédés à utiliser et d'écueils sociaux et institutionnels, ceux-ci ne pourront pas être adoptés et déployés à grande échelle sans politique gouvernementale supplémentaire. Les émissions du système énergétique peuvent être principalement réduites à l'aide de trois approches principales :

- Réduction de la consommation d'énergie dans l'économie;
- Captage et stockage des émissions de dioxyde de carbone;
- Réduction de l'intensité des émissions dues à l'énergie consommée.

Les possibilités de réduire la consommation d'énergie grâce à des méthodes d'amélioration de l'efficacité et à des changements opérationnels sont nombreuses dans tous les secteurs. Dans les réseaux de transport, les véhicules légers peuvent être rendus de 30 à 50 % plus efficaces grâce à des procédés connus. La transition du transport de marchandises au rail promet également d'importants gains d'efficacité. Les nouveaux édifices peuvent apporter une réduction de 60 à 90 % de la demande énergétique pour le chauffage des locaux et la climatisation, par le recours à des principes de construction écoénergétiques, comme le chauffage solaire passif, une meilleure isolation et des thermopompes à air et à eau et des pompes géothermiques. Dans l'industrie, l'amélioration du matériel et de l'entretien, l'intégration industrielle et une plus faible consommation d'énergie pour la transformation des matériaux peuvent contribuer à une réduction des émissions. En ce qui concerne l'électricité, l'industrie et le bâtiment, un usage accru de la cogénération pourrait aussi se traduire par des économies d'énergie. Ces types de gains d'efficacité entraînent souvent la diminution rapide des émissions et peuvent engendrer de substantielles réductions agrégées lorsqu'ils sont poursuivis à long terme.

Toutefois, pour obtenir une réduction plus étendue des émissions, il faudra utiliser le captage et stockage du carbone ou passer à des sources d'énergie à faibles émissions. L'électricité à faibles émissions est fondamentale pour parvenir à une réduction des émissions à l'échelle de l'économie dans le secteur du transport, du bâtiment et de l'industrie. Si le Canada dispose déjà

d'une production d'électricité à émissions relativement faibles, les installations de production à fortes émissions restantes devront être remplacées et toutes les provinces devront développer leurs moyens de production d'électricité à faibles émissions pour satisfaire la demande croissante et réduire encore leurs rejets. L'hydroélectricité, l'énergie nucléaire, solaire, éolienne et géothermique, la biomasse et les combustibles fossiles avec CSC sont tous des solutions de production à faibles émissions viables pour le Canada. Dans le domaine du transport de marchandises, le biodiésel est le carburant de substitution le plus prometteur pour réduire les émissions. Pour ce qui est des véhicules de tourisme légers, les voitures électriques mues par de l'électricité à faibles émissions offrent un vaste potentiel de réductions, bien que les carburants et les technologies de substitution pourraient aussi avoir leur mot à dire. La substitution interénergétique dans le secteur du bâtiment serait certainement axée principalement sur la transition à l'électricité comme source de chauffage des locaux (laquelle pourrait être rentable une fois des gains d'efficacité majeurs réalisés). Dans l'industrie, l'électricité, la biomasse et les combustibles fossiles avec CSC peuvent tous être employés comme sources d'énergie, la source optimale dépendant du contexte industriel. La question des émissions fugitives rejetées par le secteur pétrolier et gazier peut être traitée de différentes façons, notamment par la surveillance et la réparation des fuites des réseaux de production et de distribution du gaz ou par le captage et le stockage du gaz pendant la complétion des puits au lieu de sa mise à l'air libre ou de son torchage.

Dans de nombreux cas, la transition vers un système énergétique à faibles émissions est entravée par des contraintes systémiques dues à la longévité des immobilisations. Accroître la production d'électricité à faibles émissions peut nécessiter d'étendre ou de modifier les réseaux de transport et de distribution et complexifier la gestion du réseau et l'équilibre de la charge. L'extension de la production à faibles émissions peut aussi soulever l'opposition de la population en raison d'impacts environnementaux localisés; elle requiert donc une approche systémique de la planification de la consommation de l'énergie et de l'affectation des terres. Les réseaux de transport dépendent des réseaux de production et de distribution de carburant et les perspectives de la substitution interénergétique reposent sur la disponibilité de l'infrastructure d'approvisionnement requise. L'aménagement urbain et les investissements dans l'infrastructure peuvent faciliter la construction et le développement de bâtiments, d'industries et de communautés peu émettrices.

# 4

## Politiques publiques concernant les systèmes énergétiques à faibles émissions

- La nécessité de politiques contraignantes
- Évaluation des politiques sur les changements climatiques
- Instruments politiques contraignants
- Politiques habilitantes
- Les possibles répercussions économiques de la transition vers un système énergétique à faibles émissions au Canada
- Résumé

## 4 Politiques publiques concernant les systèmes énergétiques à faibles émissions

### Principales constatations

- Au Canada, certaines politiques provinciales et fédérales ont permis de réduire les émissions, et des entreprises et des consommateurs prennent des mesures indépendantes pour freiner leurs émissions. Cependant, des politiques contraignantes plus strictes sont nécessaires pour réaliser de substantielles réductions des émissions globales.
- Le choix des instruments politiques favorisant la réduction des émissions dépend du contexte et de la façon dont les décideurs pèsent leurs différents objectifs. Quel que soit le type des politiques contraignantes adoptées, il existe des stratégies pouvant améliorer leur efficacité environnementale, leur rapport coût-efficacité, l'équité de leur distribution, leur faisabilité administrative et leur acceptabilité.
- Les politiques qui imposent un prix uniforme au carbone dans toute l'économie sont plus efficaces pour limiter les coûts de la réduction des émissions. Surtout dans l'industrie, d'excellents arguments plaident en faveur de politiques qui mettent un prix sur le carbone — que ce soit par l'intermédiaire d'une taxe ou d'un système de plafonnement et d'échange — en raison de l'hétérogénéité du secteur et des efforts constants déployés pour limiter les coûts.
- En plus de promulguer des politiques contraignantes, les gouvernements peuvent jouer d'importants rôles, comme ajuster les subventions, effectuer des investissements directs, fournir l'infrastructure, appuyer l'innovation et rendre les processus réglementaires relatifs aux technologies à faibles émissions plus efficaces.
- Le Canada pourrait mettre en place des politiques climatiques bien plus efficaces que celles actuellement en vigueur sans compromettre son bien-être économique.

Les chapitres précédents ont établi que le Canada satisfait bon nombre de ses besoins énergétiques au moyen de sources à fortes émissions et que cette dépendance continuera si aucune combinaison de changements technologiques et politiques majeurs n'est mise sur pied. Le présent chapitre étudie la manière dont les politiques peuvent motiver la transition vers un système énergétique à faibles émissions. L'expérience de ces dernières décennies prouve la nécessité d'imposer des contraintes obligatoires ou des pénalités financières aux émissions. Les sections qui suivent se penchent donc sur une série de politiques instaurant de telles mesures. Il examine également les politiques habilitantes susceptibles de favoriser encore la réduction des émissions. Dans les deux cas, le chapitre exploite les leçons tirées en matière de conception et de mise en application de politiques stimulant le changement de système.

## 4.1 LA NÉCESSITÉ DE POLITIQUES CONTRAIGNANTES

Des entreprises et des individus ont déjà accompli des efforts volontaires de réduction des émissions. Pour certaines entreprises, les changements climatiques représentent une occasion de mettre en marché de nouvelles technologies à faibles émissions, de mobiliser du capital pour soutenir les technologies émergentes, de réduire leurs coûts énergétiques et d'améliorer leur réputation. Certaines exercent également des pressions pour que des mesures collectives soient prises contre les changements climatiques<sup>27</sup>. Dans un même temps, de nombreux individus modifient leur comportement pour réduire les émissions, par exemple en changeant de mode de transport ou en améliorant l'efficacité de leur maison. Les gouvernements ont aussi lancé des campagnes d'information et d'éducation publiques pour encourager les entreprises et les consommateurs à amorcer ce genre de changement volontaire de comportement.

Head (2008) répertorie plusieurs caractéristiques qui font de la réduction des émissions de dioxyde de carbone et de l'atténuation des changements climatiques un problème de politique publique particulièrement délicat, notamment la variabilité de l'horizon temporel, l'ampleur des répercussions et des coûts à prévoir, l'attribution contestée des responsabilités, les craintes en ce qui concerne l'équité et les interrelations entre les éléments des changements climatiques. En outre, les dépenses nécessaires pour réduire les émissions seront engagées à court terme, alors que les avantages varieront d'une région à l'autre et ne se matérialiseront principalement que plusieurs décennies plus tard (Victor, 2011). Par ailleurs, les efforts pour réduire l'utilisation des combustibles fossiles dans certaines régions peuvent provoquer la chute du cours de ces combustibles ailleurs et même encourager l'accélération de leur extraction en prévision de politiques plus draconiennes (Sinn, 2008). La tentation pour chaque pays de profiter gratuitement des réductions des émissions réalisées ailleurs dans le monde complique encore la mise en application et met en lumière la nécessité d'une solution internationale. Présenter les changements climatiques comme un problème environnemental sans tenir compte du risque et des possibilités qu'ils créent pour l'énergie, le système financier et la culture du Canada nuit également aux efforts. Pour ces raisons, les diverses initiatives politiques lancées au Canada depuis le début des années 1990 — qui ont largement encouragé les gestes volontaires — n'ont pas suffi pour réduire les émissions au niveau requis pour atteindre les cibles fédérales. Au contraire, les émissions globales ont augmenté (voir le chapitre 2). Tant qu'il sera possible de rejeter librement le dioxyde de carbone dans l'atmosphère, les gens et les entreprises continueront

---

27 Aux États-Unis, plusieurs leaders industriels et politiques ont lancé le projet *Risky Business*, « axé sur la quantification et la publicisation des risques économiques des répercussions des changements climatiques » [traduction libre] (*Risky Business*, s.d.).

de préférer fréquemment les combustibles fossiles parce qu'ils sont généralement bon marché, pratiques, abondants, largement distribués, faciles à transporter et denses en énergie comparés aux solutions de substitution.

Il est donc évident que si l'on souhaite réduire de manière généralisée les émissions, il faut adopter de nouvelles politiques contraignantes. Dans ce domaine, plusieurs choix s'offrent aux décideurs, notamment les taxes sur le carbone, la réglementation classique et la réglementation fondée sur le marché, comme les systèmes de plafonnement et d'échange (ces instruments sont étudiés à la section 4.3). Chacune de ces options agira de façon particulière pour encourager les entreprises à modifier leur processus décisionnel et motiver les consommateurs à changer de comportement, en modifiant le coût de faire des affaires ou en exerçant de nouvelles contraintes auxquelles les entreprises et les consommateurs devront s'ajuster. Par exemple, imposer une taxe de carbone à l'échelle de l'économie pourrait entraîner la modification du comportement individuel par la pose de gestes discrets, comme l'installation d'une chaudière plus efficace ou l'amélioration de l'efficacité de son habitation, voire le déménagement dans une maison plus petite et plus écoénergétique. De nouvelles politiques pourraient même élargir les options accessibles à la population. Par exemple, les fabricants de chaudières pourraient produire des modèles plus écoénergétiques si les consommateurs étaient prêts à payer suffisamment cher..

Implanter de nouvelles politiques est plus facile quand les consommateurs, les entreprises et les gouvernements comprennent les raisons et la nécessité de l'action gouvernementale. Le comité d'experts a aussi relevé d'autres conditions sociopolitiques pour les changements politiques, notamment des normes sociales particulières et un certain désir de changer de comportement, de nouvelles possibilités pour les entreprises, la reconnaissance des avantages conjoints potentiels et de la possibilité d'éviter les coûts de la réduction des émissions et des mécanismes favorisant la coopération et l'harmonisation entre les gouvernements. Ces conditions sont rarement remplies dans le paysage politique canadien. Cependant, certains signes récents démontrent la faisabilité croissante de mesures politiques plus fortes : les technologies nécessaires pour soutenir la réduction généralisée des émissions sont plus disponibles et abordables, davantage d'entreprises se lancent dans le marché des technologies propres<sup>28</sup>, le public continue à voir l'environnement comme une question de politique publique importante et les provinces instaurent de nouvelles politiques, dont certaines se révèlent prometteuses pour la réduction des émissions dans des

---

28 Selon la firme de consultants Analytica Advisors (2015), en 2015, 50 000 Canadiens étaient employés dans le domaine des technologies propres. Les entreprises de ce secteur utilisent « une technologie exclusive pour offrir des produits ou des services réduisant les impacts environnementaux négatifs, tout en étant concurrentiels ou en exigeant moins de ressources que les produits et services conventionnels » [traduction libre] (Analytica Advisors, 2013).

régions et des secteurs d'activités précis (voir la section 4.3). Les provinces se sont aussi récemment entendues sur une stratégie énergétique pancanadienne visant à favoriser la collaboration en matière de politique énergétique et de réduction des émissions (Premiers ministres, 2015). Cette évolution met en évidence le fait que la porte est ouverte à de nouvelles avancées en matière de politiques sur les changements climatiques.

## 4.2 ÉVALUATION DES POLITIQUES SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

La meilleure solution pour ce qui est de la politique sur les changements climatiques dans un État donné dépend, entre bien d'autres choses, de la situation politique, du problème que la politique cherche à résoudre et du ou des secteurs ciblés. Les politiques environnementales sont souvent évaluées à partir d'une variante quelconque des critères suivants (Gupta *et al.*, 2007; Goulder et Parry, 2008):

- *Efficacité environnementale.* Capacité de la politique à réaliser son objectif de réduction des émissions sans compromettre d'autres objectifs environnementaux (p. ex. propreté de l'eau). Toutes choses étant égales par ailleurs, une politique mènera à de plus grandes réductions des émissions quand elle porte sur davantage de sources d'émissions et de types de gaz à effet de serre, quand ses cibles de réduction sont plus strictes et quand elle prévoit des mécanismes d'application et des pénalités plus sévères (Gupta *et al.*, 2007). Les rapports de performance et l'évaluation du programme sont deux outils importants de mesure de l'efficacité environnementale d'une politique.
- *Rapport coût-efficacité.* Les politiques affichant le meilleur rapport coût-efficacité sont celles qui réalisent leurs objectifs au coût le plus bas possible pour la société. Le coût d'une politique découle de nombreux facteurs, dont les répercussions économiques sur les gens ou les entreprises visés par la politique, les coûts administratifs pour les gouvernements et les effets sur l'économie dans son ensemble (comme l'emploi ou l'innovation) (Goulder et Parry, 2008). Les politiques peuvent encourager les profiteurs, créer une aubaine exceptionnelle pour certains participants ou désavantager les nouveaux compétiteurs, trois conséquences qui peuvent influencer sur son rapport coût-efficacité. Le fait que la politique incite au changement technologique est également un paramètre important en soi (Stavins, 1997) qui, en fin de compte, a lui aussi un effet sur le rapport coût-efficacité de la politique.
- *Équité distributive.* Les politiques sur les changements climatiques peuvent créer un éventail d'incidences distributives, par la redistribution de la richesse entre les régions, les groupes de revenus et même les générations. L'équité perçue de cette redistribution varie selon le segment de la société, et l'équité interrégionale est un des principaux défis des négociations des ententes sur les changements climatiques. En raison des écarts de disponibilité des

ressources naturelles et des choix politiques énergétiques d'une province ou d'un territoire canadien à l'autre, les contraintes économiques imposées par les politiques de réduction des émissions varient également au pays.

- *Faisabilité administrative.* Certaines politiques sont simples à administrer, alors que d'autres réclament un intense travail pour donner des résultats. Les défis administratifs comprennent la surveillance et la vérification des émissions, l'application, la capacité institutionnelle et la nécessité d'amender et d'adapter les politiques à mesure que de nouveaux renseignements émergent (Gupta *et al.*, 2007; Goulder et Parry, 2008). La situation canadienne complique encore les choses en raison du partage des responsabilités concernant la gestion des changements climatiques entre les gouvernements fédéral et provinciaux (voir l'encadré 4.1).
- *Acceptabilité politique.* L'acceptabilité politique correspond au degré d'adhésion des décideurs, qui dépend de l'attitude du public, de groupes particuliers d'intérêts, de la structure de l'économie et du soutien des fonctionnaires et de leur aptitude à mettre la politique en application. L'appui politique peut se heurter à plusieurs écueils, dont le manque de familiarité avec l'instrument politique proposé, des inquiétudes concernant les pertes financières ou des répercussions distributives impopulaires (Gupta *et al.*, 2007).

#### Encadré 4.1

#### Champs de compétence et politiques canadiennes sur les changements climatiques

En matière environnementale, les gouvernements provinciaux et fédéral canadiens possèdent des compétences et des pouvoirs juridiques différents (Hsu et Elliot, 2008). En outre, les gouvernements provinciaux peuvent déléguer leurs pouvoirs aux municipalités (dont certaines ont introduit des politiques sur les changements climatiques) et le gouvernement fédéral peut déléguer des pouvoirs aux gouvernements territoriaux. Des mécanismes permettant de s'attaquer aux émissions ont été introduits à l'échelle fédérale et provinciale et chaque ordre dispose des pouvoirs appropriés. Les gouvernements fédéral et provinciaux disposent du pouvoir de taxation et les provinces peuvent réglementer les industries sur leur territoire. De plus, le gouvernement fédéral peut adopter des lois sur la protection de l'environnement qui s'appliquent à des champs de compétence provinciaux grâce au pouvoir fédéral en matière de droit criminel (comme il l'a fait pour limiter les émissions de produits toxiques avec la *Loi canadienne sur la protection de l'environnement* (LCPE)). Les décisions rendues par les tribunaux jusqu'à ce jour indiquent que la réglementation des gaz à effet de serre en vertu de la LCPE sera certainement jugée constitutionnelle (Hogg, 2008). Si d'aucuns ont suggéré que le gouvernement fédéral pourrait aussi exploiter sa responsabilité à l'égard de la paix, de l'ordre et du bon gouvernement

*suite à la page suivante*

ou ses pouvoirs sur les échanges et le commerce pour réglementer les émissions, les pouvoirs relatifs au droit criminel sont mieux adaptés (Lucas et Yearsley, 2011). En raison de cette diversité de compétences, aucune entité n'est seule responsable, et chaque ordre de gouvernement peut prendre les mesures nécessaires.

Dans les circonstances, il n'est pas surprenant que la cohérence et l'harmonisation des politiques posent problème. Par exemple, un producteur d'énergie peut être soumis à une série de politiques environnementales et industrielles établies par les gouvernements fédéral et provinciaux et par des administrations municipales. Une subvention provinciale accordée au secteur énergétique pourrait diluer l'effet d'un prix imposé sur le carbone à l'échelle fédérale (Hood, 2013). De même, les délais fédéraux d'approbation de la construction de réseaux de transport d'électricité interprovinciaux pourraient limiter la capacité des provinces à collaborer à la réduction des émissions grâce à l'électricité. Les gouvernements provinciaux ont aussi affirmé que leurs pouvoirs constitutionnels sur les ressources naturelles leur permettaient de profiter des occasions de s'engager efficacement dans des discussions et des négociations internationales sur l'énergie et le climat (Premiers ministres, 2015).

Enfin, les relations entre les gouvernements fédéral et provinciaux et les peuples autochtones sont complexes. Le comité d'experts note que lors de l'établissement de politiques sur les changements climatiques, il est important de respecter les ententes détaillées, souvent définies par les droits de propriété et les droits accordés par les traités, conclues entre les parties. La question des champs de compétence est particulièrement pertinente dans le cas de la construction d'une nouvelle infrastructure, comme le souligne le récent jugement capital rendu par la Cour suprême du Canada qui a accordé à la Première nation Tsilhqot'in le droit de propriété sur plus de 1 700 kilomètres carrés de terres en Colombie-Britannique (CSC, 2014).

*suite à la page suivante*

	Fédéral	Provincial
Champ de compétence	Environnement <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eaux côtières</li> <li>• Navigation maritime</li> <li>• Terres fédérales</li> </ul> Secteur d'utilisation finale <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transport interprovincial</li> </ul>	Environnement <ul style="list-style-type: none"> <li>• Terres publiques provinciales (et ressources naturelles qu'elles recèlent)</li> <li>• Institutions municipales</li> <li>• Exploration des ressources</li> </ul> Secteur d'utilisation finale <ul style="list-style-type: none"> <li>• Production d'électricité</li> <li>• Transport interprovincial</li> <li>• Bâtiment</li> <li>• Industrie</li> </ul>
Pouvoirs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taxation</li> <li>• Réglementation</li> <li>• Droit criminel</li> <li>• Paix, ordre et bon gouvernement</li> <li>• Échanges et commerce</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taxation</li> <li>• Réglementation</li> <li>• Droit de propriété</li> <li>• Droits civils</li> </ul>

Les politiques — et l'importance relative des critères employés pour les juger — auront des effets différents dans les secteurs de l'électricité, du transport, du bâtiment et de l'industrie, et le choix s'appuiera sur des considérations relatives à la nature et à la dynamique du ou des secteurs ciblés. Les caractéristiques du problème qu'une politique cherche à régler sont également importantes et façonnent l'évaluation des options. Par exemple, des politiques contraignantes d'atténuation des gaz à effet de serre, comme les mécanismes de plafonnement et d'échange et les taxes sur le carbone visent les coûts cachés des émissions, qui sont généralement ignorés dans la prise de décision des producteurs et des consommateurs, par la fixation d'un prix au carbone. Inversement, les politiques habilitantes qui encouragent l'innovation (p. ex. grâce à des avantages fiscaux) peuvent aider à surmonter le problème causé par des entreprises, des individus ou des sociétés qui profitent gratuitement et à grande échelle des investissements dans la recherche-développement (R-D) d'autres, puisque les connaissances et les technologies qui en résulteront finiront par devenir un bien public (CAC, 2013).

### 4.3 INSTRUMENTS POLITIQUES CONTRAIGNANTS

Les politiques contraignantes se situent sur un continuum d'intervention gouvernementale. À une extrémité de ce continuum, on retrouve les politiques souples axées sur le marché, comme les taxes sur le carbone qui imposent des frais sur le résultat préjudiciable (émissions de gaz à effet de serre) et offre aux entreprises et aux foyers la possibilité soit de payer ces frais soit de modifier leurs décisions d'investissement et leur comportement de façon à réduire

leurs émissions. À l'autre extrémité réside la réglementation prescriptive et coercitive qui fixe en détail les choix d'investissement ou de comportement des entreprises et des foyers (p. ex. tous les réfrigérateurs de taille X doivent respecter une norme d'efficacité énergétique minimum Y). La réglementation axée sur le marché (comme le système de plafonnement et d'échange) se situe quelque part entre les deux. Chaque option a ses caractéristiques particulières.

#### 4.3.1 Taxes sur le carbone

Une taxe sur le carbone exige que tout émetteur paye des droits pour chaque tonne de dioxyde de carbone rejetée dans l'atmosphère<sup>29</sup>. Les taxes sur les émissions créent un tarif uniforme pour le carbone, qui fait en sorte que les émetteurs pouvant réduire leurs rejets de manière peu coûteuse le feront (pour éviter d'avoir à payer la taxe), alors que les émetteurs pour lesquels les réductions seraient coûteuses payeront plutôt la taxe. Ce mécanisme fait en sorte que les réductions des émissions sont concentrées dans les secteurs ou activités économiques où leur coût est le moins élevé. L'imposition d'un prix aux émissions incite également à réaliser constamment de nouvelles réductions, ce qui peut engendrer une dynamique d'innovation technologique. En 2008, la Colombie-Britannique a introduit une taxe sur le carbone de 10 \$ la tonne qui a progressivement augmenté pour atteindre 30 \$ la tonne en 2015. Si les économistes de l'énergie savent depuis longtemps que la demande énergétique chute quand les prix montent, il faudra du temps pour évaluer l'effet complet de la taxe sur le carbone britanno-colombienne sur la consommation de combustibles fossiles et sur les émissions de gaz à effet de serre, surtout parce que la mise en place de la taxe a coïncidé avec une récession économique. Cependant, des recherches préliminaires ont montré qu'entre 2008 et 2012, la Colombie-Britannique a enregistré une baisse de 17 % de la consommation de combustible par habitant, alors qu'elle a légèrement augmenté dans le reste du Canada (Elgie et McClay, 2013). En outre, la taxe semble avoir provoqué une réduction de l'utilisation de l'essence plus forte que celle qui aurait été stimulée par une hausse équivalente du prix du gaz naturel sur le marché (Rivers et Schaufele, 2012).

Les taxes sur le carbone peuvent apporter de nouveaux revenus aux gouvernements, ou être neutres sur ce plan si les recettes qu'elle génère sont employées pour financer la réduction d'autres taxes ou des paiements forfaitaires destinés à la population en général (le régime de redevances et dividendes prôné par James Hansen (Hansen, 2009)). Les mesures de recyclage des recettes peuvent améliorer l'équité distributive des taxes sur le carbone,

---

<sup>29</sup> Les émissions de gaz à effet de serre autres que le dioxyde de carbone sont converties en équivalent dioxyde de carbone (éqCO<sub>2</sub>) selon leur potentiel de réchauffement planétaire.

comme cela est le cas en Colombie-Britannique. Une partie des recettes de taxation finance un crédit d'impôt remboursable destiné aux groupes à faibles revenus et réduit le taux des deux tranches d'imposition inférieures (Gouv. de la C.-B., s.d.a). Le recyclage des recettes pourrait aussi servir à compenser l'inégalité des répercussions régionales, à répondre aux inquiétudes concernant la compétitivité ou à réduire les distorsions produites par d'autres taxes (p. ex. emploi des recettes de la taxe sur le carbone pour réduire l'impôt sur le revenu, lequel qui impose une inefficacité et des coûts à l'économie).

Un des principaux avantages administratifs d'une taxe est qu'il est possible d'utiliser le système fiscal actuel pour la gérer, au lieu d'accroître la bureaucratie. Cependant, les systèmes fiscaux posent encore certains défis : les décideurs doivent effectuer un ensemble de choix au sujet des stratégies de surveillance des émissions estimatives, des activités à exonérer de taxe (le cas échéant) et de l'endroit où imposer la taxe — en amont aux producteurs ou en aval aux consommateurs. Chacun de ces choix peut simplifier ou compliquer l'administration de la taxe. En Colombie-Britannique, la taxe est calculée en fonction du contenu en carbone de chaque combustible; des exonérations sont offertes pour les procédés industriels, les émissions non issues de la combustion et les combustibles à des fins agricoles. Tout comme pour la taxe de vente provinciale, la taxe sur le carbone y est imposée en amont, au niveau des grossistes pour les carburants et au niveau de la vente au détail pour le gaz naturel et le propane (MFCB, 2013; Gouv. de la C.-B., n.d.a).

Les taxes sur le carbone sont un sujet de discordance politique, comme c'est le cas de toute politique perçue comme augmentant les coûts de l'énergie pour les consommateurs. La différence d'appui de la population entre la taxe sur le carbone et d'autres mesures d'atténuation des changements climatiques peut être observée en Colombie-Britannique, où un sondage sur l'opinion publique a révélé que la population soutenait les méthodes réglementaires à environ 90 %, tandis que l'appui à la taxe sur le carbone était de 56 % (Rhodes *et al.*, 2014). En général, les gens n'appuient pas les mesures politiques qui leur imposent des coûts évidents, surtout quand les bénéfices sont retardés (Harrison, 2012). De plus, le soutien de la population peut décliner à mesure que les taxes deviennent plus strictes et ont une incidence financière plus grande sur les consommateurs. Une récente enquête réalisée aux États-Unis a constaté un appui limité à la taxe sur le carbone quand l'emploi des recettes n'est pas précisé. Cependant, une faible majorité de répondants a indiqué appuyer une taxe neutre sur le plan des revenus si les recettes sont retournées au public, et une majorité légèrement plus importante soutenait une taxe dont les recettes servaient à financer la R-D sur les énergies renouvelables (Amdur *et al.*, 2014).

### 4.3.2 Réglementation fondée sur le marché

#### Systèmes de plafonnement et d'échange

Contrairement au principe de la taxe sur le carbone, dans lequel le gouvernement fixe un prix aux émissions, dans les mécanismes de plafonnement et d'échange, il établit une limite à la quantité totale d'émissions. Il délivre ensuite des permis pour le plafond en question et les entreprises doivent présenter, à la fin de chaque période de conformité, suffisamment de permis pour les émissions qu'ils rejettent. Les entreprises qui manquent de permis peuvent en acheter à celles qui en ont en surplus, le marché ainsi créé fixant un prix uniforme pour les émissions de dioxyde de carbone en fonction de l'offre et de la demande. La valeur marchande des permis encourage les réductions des émissions même au-delà du plafond d'une entreprise, ce qui renforce la capacité de la politique à motiver la réduction soutenue des émissions dans le temps.

Il existe deux modèles d'échange des permis au Canada. Le *Specified Gas Emitters Regulation* de l'Alberta s'applique aux usines qui émettent plus de 100 000 tonnes  $\text{eqCO}_2$  par année et procure de la souplesse en matière de conformité par l'échange d'émissions (entre autres) (AEP, 2015). Cette mesure limite les émissions par unité de production — il s'agit donc d'un système d'échange basé sur l'intensité des émissions plutôt que d'un système de plafonnement et d'échange — et comme le plafond n'est pas rigide, il a permis une hausse substantielle des émissions totales depuis l'entrée en vigueur de la politique. Au contraire, le Québec a récemment introduit un mécanisme de plafonnement et d'échange qui s'applique aux gros émetteurs et distributeurs de combustible, c'est-à-dire à ceux qui rejettent au moins l'équivalent de 25 000 tonnes de dioxyde de carbone par année (Gouv. du Qc, 2014). L'Ontario a récemment annoncé son intention de se joindre au système auquel appartient le Québec. Un résumé des programmes de l'Alberta et du Québec est présenté au tableau 4.1.

Les répercussions distributives d'un système de plafonnement et d'échange dépendent de la façon dont les permis sont attribués à l'origine. Une délivrance gratuite crée de la valeur pour les entreprises existantes (ou autre) bénéficiaires de ces permis, mais peut désavantager les nouveaux venus dans le système (Stavins, 1997, 1998). Un mécanisme d'échange des permis d'émissions peut être complexe à gérer et exiger la création d'un système et d'un processus administratifs, la conception soignée de plans de surveillance et d'application et la prise de plusieurs décisions concernant les options de conformité flexible. Par exemple, le système permet-il de mettre en banque des permis pour les utiliser les années ultérieures? Fixe-t-il un plancher ou un plafond au prix des permis? Le système doit-il comporter un plafond fixe ou le taux d'émissions doit-il être limité selon un mécanisme fondé sur l'intensité? Ces décisions font des gagnants et des perdants et peuvent donc être controversées.

Tableau 4.1

## Comparaison des mécanismes d'échange de l'Alberta et du Québec

Province	Type d'instrument du marché	Cible et couverture	Principales caractéristiques
Alberta	Système d'échange basé sur l'intensité	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 12 % de réduction de l'intensité des émissions des usines rejetant plus de 100 000 tonnes éqCO<sub>2</sub> par année.</li> <li>• Hausse de la cible à 20 % en 2017.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impose des limites par unité de production plutôt qu'une quantité absolue.</li> <li>• Un système de compensation intègre les projets de réduction des émissions en Alberta aux usines non réglementées.</li> <li>• Pour les émissions qui dépassent la cible de réduction de l'intensité de 12 %, la conformité peut être atteinte par le paiement d'un prix plafond de 15 \$/tonne au Climate Change and Emissions Management Fund (CCEMF) (qui augmentera à 30 \$/tonne en 2017) ou par d'autres mécanismes flexibles de conformité.</li> <li>• Quand on tient compte des émissions totales plutôt que seulement des émissions dépassant la cible d'intensité, le prix plafond réel du système en 2015 pourrait n'être que de 1,80 \$/tonne.</li> <li>• Le mécanisme a entraîné une réduction de 61 Mt éqCO<sub>2</sub> durant les 8 premières années et a rapporté 578 millions de dollars au CCEMF.</li> <li>• Les recettes du CCEMF sont principalement utilisées pour soutenir les projets de réduction des GES dans la province.</li> </ul>

*suite à la page suivante*

Province	Type d'instrument du marché	Cible et couverture	Principales caractéristiques
Québec	Système de plafonnement et d'échange	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fait partie des mesures d'atteinte de l'objectif provincial de réduction des émissions de 20 % d'ici à 2020 par rapport au niveau de 1990.</li> <li>Le plafond devient de plus en plus strict avec le temps.</li> <li>S'applique aux entreprises qui produisent ou distribuent une quantité de combustibles fossiles dont la combustion rejette au moins 25 000 tonnes éqCO<sub>2</sub> par an (couvre 85 % des émissions provinciales).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lié au système d'échange des émissions de la Californie.</li> <li>Permis délivrés gratuitement ou par enchères, les attributions gratuites servant à répondre aux craintes concernant la compétitivité.</li> <li>Système de compensation par crédits pouvant couvrir jusqu'à 8 % des obligations de conformité d'une entreprise.</li> <li>Crédits pour mesures précoces offerts pour les réductions vérifiées entre 2008 et 2012.</li> <li>Le prix minimum des enchères augmente au fur et à mesure et un mécanisme de plafonnement du prix peut être activé au besoin.</li> <li>Le produit des enchères finance d'autres initiatives de développement durable.</li> </ul>

Sources : AEP (2015), Leach (2012), Gouv. du Qc (2014), Environnement Canada (2015a, 2015b)

L'Alberta et le Québec ont tous deux mis sur pied un système d'échange des émissions. Les différences de couverture, de rigueur et de flexibilité des mécanismes mettent en lumière les nombreux choix importants inhérents à la conception de politiques.

Les systèmes d'échange imposent des coûts administratifs aux participants qui doivent recueillir des renseignements sur le marché des permis et acheter et vendre ces permis; ces coûts sont appelés *coûts de transaction*. Pour cette raison, les mécanismes d'échange s'appliquent généralement en amont aux producteurs ou aux distributeurs de combustibles plutôt qu'aux consommateurs. Le *Specified Gas Emitters Regulation* de l'Alberta et le mécanisme d'échange des quotas d'émissions de l'Union européenne ont été pensés pour les émissions rejetées par les grosses industries. Les autres mécanismes, comme les programmes associés mis sur pied en Californie et au Québec dans le cadre de la Western Climate Initiative, s'appliquent également en amont, mais incluent les distributeurs de combustibles dans le but de s'attaquer aux émissions des consommateurs (en particulier celles liées au transport routier). Cette approche prouve à quel point l'échange peut couvrir une vaste partie des émissions globales tout en limitant le nombre de participants. Le fait que les coûts pour les consommateurs soient peu visibles tend à rendre l'échange plus politiquement acceptable qu'une taxe sur le carbone (Harrison, 2013).

### Échange d'obligations et de certificats

Alors que les systèmes de plafonnement et d'échange fixent une limite (plafond) à un produit indésirable (dans ce cas, les émissions de gaz à effet de serre), les systèmes d'échange des obligations et des certificats font l'inverse. Ils exigent d'abord un niveau minimum de produit désirable, comme des véhicules à faibles émissions ou la production d'électricité renouvelable, puis délivrent des certificats pour chaque unité du produit désirable réalisée. Comme les systèmes de plafonnement et d'échange, ces mécanismes fondés sur le marché permettent l'échange et offrent de la souplesse en matière de conformité de diverses manières. En autorisant l'échange d'obligations entre les entités réglementées, ces politiques incitent les entreprises à produire davantage du produit désirable que ne l'exige la réglementation. Elles peuvent donc stimuler indirectement une réduction accrue des émissions.

La norme sur les émissions des véhicules de Californie utilise cet instrument politique pour encourager la conception de nouveaux véhicules à émissions faibles ou nulles, car elle exige que ces derniers représentent une proportion précise (et croissante) des ventes totales, tout en permettant l'échange de permis entre les fabricants (Jaccard, 2006b). Une norme sur les émissions des véhicules « accélère la conception, la commercialisation et la diffusion de véhicules à faibles émissions, tout en laissant l'industrie choisir les technologies répondant au critère d'émissions qui correspondent aux préférences de ses clients » [traduction libre] (Jaccard et Rivers, 2008). Le gouvernement du Canada a adopté des règlements fondés sur le rendement pour les véhicules de tourisme, qui obligent une réduction graduelle des émissions d'échappement des voitures et des camionnettes, conformément à la réglementation en place aux États-Unis (GC, 2014a). Cette réglementation offre une certaine flexibilité visant à réduire la lourdeur des exigences (GC, 2014a) :

- Les exigences s'appliquent à la flotte de véhicules de chaque entreprise plutôt qu'à chaque véhicule;
- Les entreprises peuvent obtenir des crédits les années où elles dépassent les exigences et les utiliser les années où elles ne les respectent pas ou les vendre à d'autres entreprises qui pourront s'en servir à leur discrétion durant les cinq années suivantes (GC, 2014a).

Les normes relatives au portefeuille d'énergies renouvelables (NPER) constituent un autre genre répandu de système d'échange d'obligations et de certificats (il est largement utilisé aux États-Unis). Elles fixent une proportion minimale de la production d'électricité globale devant provenir de sources renouvelables et peuvent offrir de la souplesse en matière de conformité grâce à des stratégies telles que l'échange de crédits d'énergie renouvelable entre les producteurs, le plafonnement du prix des crédits, des cibles différenciées pour différents types

d'énergies renouvelables et la possibilité de prendre en compte la moyenne du rendement sur plusieurs années (Berry et Jaccard, 2001). Les NPER ont tendance à renforcer les exigences d'énergie renouvelable avec le temps (Rabe, 2007).

Les NPER offrent plusieurs avantages : elles incitent les producteurs d'énergie à satisfaire la norme au coût le plus bas possible au lieu de favoriser une source renouvelable par rapport à une autre; les gouvernements ont peu à intervenir; et les producteurs favorisent les énergies renouvelables qui produisent plus d'électricité durant les périodes de pointe, puisque le prix de l'électricité est plus élevé à ce moment-là<sup>30</sup> (Rabe, 2007; Linn et Richardson, 2013). Cependant, Linn et Richardson (2013) observent qu'une « norme sur le portefeuille d'énergies renouvelables est un outil relativement peu efficace — il taxe le charbon et le gaz naturel, mais de façon indiscriminée; le gaz naturel n'offre aucun crédit même s'il est plus propre » [traduction libre]. Élargir les NPER pour en faire des normes sur les énergies propres incluant le gaz naturel et l'énergie nucléaire et accordant des crédits selon le taux d'émissions réel plutôt que selon le choix technologique pourrait améliorer l'efficacité de ce type de mesure (Linn et Richardson, 2013). À ce jour, la plupart des NPER excluent les projets hydroélectriques de grande ampleur, ce qui préoccupe de nombreuses provinces canadiennes qui voient les possibilités commerciales offertes par les immenses ressources hydroélectriques que possède le Canada (Rowlands, 2014).

La Colombie-Britannique a mis sur pied une norme sur l'électricité propre similaire aux NPER, qui procure une plus grande flexibilité en ce qui concerne les options de production d'électricité. Cette norme était à l'origine une exigence contenue dans un mandat que le gouvernement avait confié à BC Hydro en janvier 2007 et a été ensuite inscrite dans la loi avec la *Clean Energy Act*, en 2010. Elle stipule que 93 % de la nouvelle production d'électricité soit issue de sources non émettrices, et un grand nombre de sources énergétiques peuvent répondre à ses dispositions (Gouv. de la C.-B., 2010, s.d.b). Par conséquent, la production d'électricité à base de combustibles fossiles est toujours permise à la condition d'utiliser le captage et stockage du carbone pour éliminer les émissions de dioxyde de carbone (Gouv. de la C.-B., n.d.b). Si cette norme ne prévoit pas de permis échangeables, elle utilise les mécanismes du marché, puisque dans ses appels d'offres aux fournisseurs d'électricité privés, BC Hydro retient le moins-disant répondant à la norme.

---

30 Cet avantage disparaît quand des subventions offrent un tarif fixe pour l'énergie renouvelable, quel que soit le moment de la journée ou la saison.

### 4.3.3 Réglementation coercitive

Comme les systèmes de plafonnement et d'échange, la réglementation coercitive (qu'on appelle souvent *normes* aux États-Unis) peut directement ou indirectement fixer une limite au volume d'émissions autorisé. Elle peut établir une norme de rendement ou prescrire (ou interdire) une technologie particulière.

Les normes d'efficacité des électroménagers sont une forme répandue de réglementation coercitive. Depuis 1995, le gouvernement du Canada a adopté des règlements exigeant une efficacité énergétique minimum pour les électroménagers, les systèmes de chauffage et de climatisation, l'éclairage et les appareils électroniques vendus au Canada (RNCAN, 2014a). La réglementation fixe une norme de rendement pour chaque type d'appareil — dans ce cas, une norme d'efficacité énergétique — qui est resserrée au fur et à mesure et ajustée pour assurer une meilleure harmonisation ou intégrer de nouveaux types de produits (RNCAN, 2012b). Sa portée est large. Par exemple, « dans le secteur résidentiel, on a prescrit des normes d'efficacité pour plus de 30 catégories de produits consommant de l'énergie, soit près de trois quarts (74 %) de l'utilisation de l'énergie à des fins résidentielles au Canada » [traduction libre] (RNCAN, 2012b). On estime que la réglementation s'est traduite par une réduction de 26 Mt éqCO<sub>2</sub> d'émissions en 2010 et les projections de réduction annuelle d'ici à 2020 sont de 45 Mt (RNCAN, 2012b).

Les approches réglementaires classiques sont généralement peu efficaces. En raison du manque de flexibilité, les entreprises peuvent devoir réduire leurs émissions selon certaines méthodes, même si des stratégies moins coûteuses pourraient procurer des avantages comparables, et elles peuvent être réticentes à innover en matière de technologies et de procédés à faibles émissions de peur que les organismes de réglementation resserrent les règles par la suite (Stavins, 1997; Gupta *et al.*, 2007). La modélisation récente effectuée par la Commission de l'écofiscalité du Canada compare les répercussions économiques d'hypothétiques politiques climatiques provinciales qui suivent une approche réglementaire coercitive rigide (exigeant une réduction des émissions de même ampleur pour tous les secteurs) avec celles de politiques qui offrent une flexibilité faisant en sorte que les réductions sont plus importantes dans les secteurs où leur coût est moindre (comme le permet un système d'échange ou une méthode réglementaire souple bien conçue). Le modèle a relevé

que le recours à une approche souple plutôt qu'à une approche prescriptive pouvait accroître le produit intérieur brut de 2,5 % en 2020 (Commission de l'écofiscalité du Canada, 2015)<sup>31</sup>.

Les normes de rendement permettent au moins aux entreprises de choisir les procédés ou les technologies qu'elles utiliseront pour satisfaire les normes, ce qui peut aider à améliorer le rapport coût-efficacité et encourager l'innovation (Stavins, 1997; Gupta *et al.*, 2007). La flexibilité peut aussi être apportée par l'allongement de la période de conformité, qui accorde aux entreprises une plus grande maîtrise du moment de la réduction des émissions, et par des délais d'exécution plus longs qui envoient un message clair aux entreprises et leur permettent de se préparer aux futurs changements réglementaires. La réglementation fédérale récente limitant les émissions de dioxyde de carbone des centrales au charbon établit une norme de rendement au lieu de stipuler une interdiction totale. Elle offre aux centrales de longs délais d'exécution et exige qu'elles apportent des changements une fois qu'elles ont atteint la fin de leur vie utile seulement (Environnement Canada, 2013a). Ce genre de flexibilité est de plus en plus courant et l'expression *réglementation coercitive* décrit mal la réalité de nombreuses approches réglementaires.

Comme dans le cas de la réglementation axée sur le marché, les conséquences sur la distribution de la réglementation coercitive peuvent être difficiles à évaluer. Les dépenses engagées par les parties réglementées sont généralement transférées aux consommateurs, mais les consommateurs ne voient pas quelle portion du prix d'un bien ou d'un service est due à la réglementation.

Stavins (1997) cerne plusieurs raisons politiques pour lesquelles la réglementation coercitive est souvent l'option préférée pour la gestion des questions environnementales : les groupes environnementaux aiment la certitude de cette approche, elle est plus familière aux législateurs et les entreprises s'en tirent mieux financièrement sous un mécanisme réglementaire. Les approches réglementaires coercitives peuvent procurer des avantages aux entreprises existantes quand elles profitent d'un traitement préférentiel par rapport aux nouveaux venus (Keohane *et al.*, 1998). De plus, les mesures réglementaires peuvent cibler des activités ou des secteurs qui bénéficient d'un appui politique.

---

31 Le même exercice de modélisation a permis de constater que les avantages économiques procurés par la flexibilité dans la façon et l'endroit où la réduction des émissions se produit dans une province donnée sont bien plus grands que les bienfaits supplémentaires du recyclage des recettes ou que la liaison entre les mécanismes provinciaux. La modélisation repose sur les cibles d'émissions de chaque province pour 2020, mais utilise des politiques de réduction des émissions stylisées plutôt que la modélisation des politiques actuelles.

#### 4.3.4 Comparaison des options politiques

Il est possible de comparer les instruments politiques selon l'efficacité environnementale, le rapport coût-efficacité, l'équité distributive, la faisabilité administrative et l'acceptabilité politique. Cependant, chacun de ces critères est qualitativement différent et il n'existe pas de manière objective d'établir un classement relatif des instruments. Chacun a ses forces et ses faiblesses, et toute évaluation comparative réelle dépend du contexte et de nombreux éléments de l'élaboration de la politique. Toutefois, Jaccard et Rivers (2008) notent qu'« il est important de choisir des politiques qui ne donnent pas de mauvais résultats face à un critère d'évaluation quelconque » [traduction libre]. Le tableau 4.2 résume nombre des caractéristiques essentielles des politiques examinées ci-dessus.

Tableau 4.2

Forces et faiblesses des instruments politiques contraignants

Type de politique	Principales variantes	Forces	Faiblesses	Clés du succès	Exemples de mécanismes existants
Taxe sur le carbone imposant un droit sur les émissions de GES au moyen du système fiscal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Programme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les entreprises et les consommateurs sont certains des coûts de la conformité.</li> <li>Moyen économique de réduire les émissions.</li> <li>Les recettes peuvent être utilisées pour réduire les autres taxes ou pour modifier les conséquences distributives de la taxe.</li> <li>Peut être administrée par les institutions existantes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les gouvernements n'ont pas de certitude quant à la réduction des émissions qu'entraînera la taxe.</li> <li>Sujet de discordes politiques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cible stricte.</li> <li>Couverture étendue.</li> <li>Recyclage des recettes.</li> <li>Lien avec l'administration fiscale actuelle.</li> <li>Simplicité du processus d'ajustement de la taxe.</li> <li>Hausse progressive de la taxe.</li> <li>Surveillance et application efficaces.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Taxe sur le carbone de Colombie-Britannique</li> </ul>
Régulation axée sur le marché	<p><b>Plafonnement et échange :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Programme plafonnant les émissions des entreprises et favorisant la création d'un marché des permis d'émission.</li> </ul> <p><b>Échange d'obligation et de certificats :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Programme établissant un niveau minimum d'un produit désirable et délivrant des certificats échangeables pour chaque unité du produit désirable réalisée.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les gouvernements sont certains de la réduction des émissions qu'il produira.</li> <li>Moyen économique de réduire les émissions.</li> <li>Les recettes peuvent servir à réduire les impôts des entreprises et des particuliers, à appuyer l'écosystème de l'innovation ou à modifier les conséquences distributives du programme.</li> <li>Les gouvernements sont certains de la réduction des émissions qu'il produira.</li> <li>Moyen économique de réduire les émissions.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les entreprises et les consommateurs ne sont pas certains des coûts de la conformité.</li> <li>Requiert de nouveaux processus administratifs.</li> <li>Coût de transaction pour les participants au marché du carbone.</li> <li>Vulnérable à la pression pour attribuer les permis d'une façon qui avantage certains groupes par rapport à d'autres.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cible stricte</li> <li>Couverture étendue</li> <li>Flexibilité en matière de conformité.</li> <li>Surveillance et application efficaces.</li> <li>Recours à un système de ventes aux enchères des permis dans la mesure du possible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bourse du carbone du Québec.</li> <li>Mécanisme d'échange des quotas d'émissions de l'Union européenne.</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Les gouvernements sont certains de la réduction des émissions qu'il produira.</li> <li>Moyen économique de réduire les émissions.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les entreprises et les consommateurs ne sont pas certains des coûts de la conformité.</li> <li>Couverture probablement limitée à un secteur économique.</li> <li>Requiert de nouveaux processus administratifs.</li> <li>Coûts de transaction pour les participants achetant et vendant des certificats</li> <li>Aucun revenu supplémentaire engrangé par les gouvernements.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cible stricte.</li> <li>Flexibilité en matière de conformité.</li> <li>Surveillance et application efficaces.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Réglementation sur les gaz à effet de serre pour les véhicules de tourisme.</li> <li>Norme sur l'électricité propre de la Colombie-Britannique.</li> </ul>

Type de politique	Principales variantes	Forces	Faiblesses	Clés du succès	Exemples de mécanismes existants
<p><b>Réglementation coercitive :</b> Norme de rendement obligatoire ou technologie prescrite/interdite.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efficace sur le plan environnemental.</li> <li>• Appui politique/public.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les coûts de conformité varient selon les participants, ce qui augmente le coût de réalisation de la réduction des émissions.</li> <li>• Peut décourager l'innovation technologique.</li> <li>• Exige des gouvernements qu'ils disposent d'un énorme volume de renseignements.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmentation progressive de la rigueur.</li> <li>• Harmonisation entre les États et établissement de liens lorsque c'est faisable.</li> <li>• S'applique à l'échelle de l'entreprise plutôt qu'à celle de l'usine pour garantir la flexibilité.</li> <li>• Intègre les éléments du marché qui améliorent la flexibilité sans mettre en péril l'intégrité environnementale.</li> <li>• Synchronisation avec le renouvellement des immobilisations.</li> <li>• Combinaison avec politiques pour couvrir de plus grands pans de l'économie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Normes d'efficacité énergétique.</li> <li>• Réglementation sur la production d'électricité au charbon.</li> </ul>	

L'examen des données probantes sur ces divers types d'instruments politiques contraignants a permis au comité d'experts de tirer plusieurs conclusions.

**Les politiques qui imposent un prix uniforme au carbone dans toute l'économie sont plus efficaces pour limiter les coûts de la réduction des émissions. Surtout dans l'industrie, d'excellents arguments plaident en faveur de politiques qui mettent un prix sur le carbone — que ce soit par l'intermédiaire d'une taxe ou d'un système de plafonnement et d'échange — en raison de l'hétérogénéité du secteur et des efforts constants déployés pour limiter les coûts.**

Un des principaux avantages des politiques qui fixent un prix pour le carbone (comme les taxes sur le carbone et les systèmes de plafonnement et d'échange) est leur capacité à appliquer un tarif uniforme à des secteurs hétérogènes. L'uniformité octroie à ces politiques un bon rapport coût-efficacité, puisque ces dernières favorisent la réduction des émissions qui commencent par les mesures les moins coûteuses. La tarification du carbone est particulièrement efficace pour l'industrie parce que les entreprises sont extrêmement sensibles au prix et que la diversité des secteurs complique l'élaboration d'une méthode réglementaire à faible coût flexible.

**Quand l'adoption d'instruments politiques particuliers se heurte à des obstacles, il existe souvent des solutions de rechange réalisant des objectifs similaires. Quel que soit le type général d'instrument adopté, il est possible d'ajuster les politiques pour améliorer leur rendement.**

La discussion sur les politiques climatiques au Canada se concentre trop sur le type de politique au détriment d'importants éléments de conception. À première vue, chaque politique semble présenter des avantages et des inconvénients distincts. Par exemple, la taxe sur le carbone apparaît comme la plus simple sur le plan administratif; le système de plafonnement et d'échange, s'il comporte un plafond absolu, offre la meilleure garantie d'atteinte d'un certain niveau de réduction des émissions; et la réglementation coercitive semble être la plus coûteuse. Mais dans la pratique, la frontière entre ces instruments est de plus en plus floue. L'administration de la taxe sur le carbone est complexifiée par les pressions politiques pour diverses exonérations (comme cela s'est produit en Colombie-Britannique), les systèmes de plafonnement et d'échange sont souvent assortis d'un prix plafond qui rend incertaines les réductions globales<sup>32</sup> et la réglementation peut comporter plusieurs dispositions flexibles pour améliorer leur rapport coût-efficacité.

---

32 Cela se produit lorsque le prix plafond est conçu de manière à permettre aux entreprises de payer des frais plutôt que d'acheter des permis. Cependant, si le plafond est établi au moyen d'une réserve qui fournit un nombre déterminé de quotas supplémentaires à un prix défini, le niveau global de réduction est maintenu.

Divers instruments politiques peuvent être utilisés pour stimuler une réduction généralisée des émissions dans l'économie et, à condition d'être précédés d'une évaluation soignée et d'être souples, faire en sorte que leurs coûts soient similaires pour tous les secteurs. Si les politiques de tarification du carbone sont les plus efficaces sur le plan des coûts, même une réglementation coercitive visant un secteur particulier peut engendrer d'énormes réductions tout en étant relativement peu coûteuse à mettre en œuvre. Quel que soit l'instrument choisi, une politique fructueuse :

- sera directement liée à des limites d'émissions contraignantes et de plus en plus sévères ou à un prix du carbone contraignant et de plus en plus élevé;
- comportera des dispositions de surveillance et des pénalités appropriées;
- offrira de la flexibilité en matière de conformité afin que les réductions soient d'abord réalisées au moyen de mesures à bas coût, avant le recours à des mesures plus dispendieuses;
- comportera un système de mise aux enchères des permis, idéalement dès le début ou le plus rapidement possible après la transition, pour éviter que les entreprises existantes ne soient avantagées par rapport aux nouvelles entreprises;
- se servira des recettes additionnelles (p. ex. tirées de la mise aux enchères des permis) pour compenser les consommateurs et les entreprises touchés de façon disproportionnée durant les périodes de transition et d'ajustement;
- s'étendra à de nombreux secteurs et de nombreux États, au moyen d'un instrument unique ou en combinaison avec d'autres politiques contraignantes (l'encadré 4.2 fournit des renseignements supplémentaires sur l'importance d'une couverture étendue).

### **L'appui politique et public aux politiques sur les changements climatiques est essentiel à leur succès.**

Quand la controverse politique ou le manque de soutien à certains instruments politiques sont des obstacles majeurs au progrès, il peut être intéressant d'envisager des instruments de rechange qui bénéficient d'un plus grand appui politique et qui permettent de réaliser les mêmes objectifs. En outre, le soutien politique à certains instruments peut autoriser des cibles plus strictes que celles qui auraient été possibles avec des mesures moins populaires. Par exemple, une norme rigoureuse sur les combustibles à faible teneur en carbone peut être plus efficace pour encourager les transformations dans le secteur du transport que l'imposition d'un prix moins rigoureux au carbone dans toute l'économie.

### Encadré 4.2

#### Couverture de la politique et fuite d'émissions

Quand les politiques d'atténuation des gaz à effet de serre s'appliquent à un État, mais pas aux autres, il y a un risque de fuite, laquelle peut se manifester de deux façons. Dans un premier scénario, la politique sur le carbone réduit la demande dans un État pour les combustibles à fortes émissions de dioxyde de carbone. Cependant, cette baisse de la demande entraîne la chute du prix de ces combustibles, qui accroît la demande dans les États imposant peu ou pas de contraintes sur les gaz à effet de serre. Dans le second scénario, les activités fortement émettrices déménagent dans un État où le coût des émissions est moindre (Stavins, 1997). Une modélisation effectuée en vue du Protocole de Kyoto a estimé le taux de fuite à 5 à 28 %, dans l'hypothèse où il n'y a pas d'échange (Viguié, 2000). Les fuites représentent un défi encore plus grand dans les secteurs d'activité fortement émetteurs et dépendants des échanges commerciaux, comme l'extraction pétrolière, la fabrication de fer et d'acier, les produits chimiques et l'extraction minière (Bataille *et al.*, 2009). Newell *et al.* (2013) relèvent que dans les faits, les fuites ne semblent pas être un problème considérable pour le moment, mais le comité d'experts a noté que cela pourrait s'expliquer par le fait que les politiques climatiques ne sont nulle part suffisamment strictes pour avoir une incidence substantielle sur les coûts de production dans un État donné. Le prix du carbone n'est qu'un facteur parmi tous ceux qui influencent le choix de l'emplacement d'une entreprise; les données empiriques indiquent qu'en pratique, la réglementation environnementale n'a pas dissuadé les investissements (Jaffe *et al.*, 1995; Levinson, 1996; Adams, 1997; cité dans Viguié, 2000). Toutefois, la menace de fuite demeure une inquiétude essentielle pour les gouvernements qui envisagent des politiques plus rigoureuses.

Plutôt que de retarder l'action, il est possible de recourir à des mécanismes qui répondent aux craintes de fuite et arriment la politique climatique nationale à des solutions mondiales. Lier le système national de plafonnement et d'échange à des systèmes étrangers peut renforcer la cohérence des politiques dans une région. Par exemple, dans le cadre de la Western Climate Initiative, la Californie et le Québec ont travaillé dans deux systèmes juridiques et deux langues pour concevoir un système lié. Un mécanisme de compensation des prix du carbone aux frontières a été proposé pour niveler les chances par la perception de droits de douane sur les importations d'États qui n'imposent pas de limites comparables sur les émissions (Cockfield, 2011).

**Il faut faire des compromis entre les rendements environnemental, économique et social de chaque type d'instrument politique.**

Les cinq critères que sont l'efficacité environnementale, le rapport coût-efficacité, l'équité distributive, la faisabilité administrative et l'acceptabilité politique peuvent entrer en concurrence les uns avec les autres. Goulder et Parry (2008) observent qu'« assurer une équité raisonnable dans la distribution des répercussions ou garantir l'acceptabilité politique requiert souvent de sacrifier le rapport coût-efficacité » [traduction libre]. Le choix de la politique pour un État repose sur une évaluation propre au contexte de ce qui compte le plus.

**Les politiques doivent réaliser un équilibre entre adaptabilité et certitude.**

L'incertitude est un élément inévitable des politiques sur les changements climatiques. Les politiques rigoureuses « peuvent inclure des technologies imprévues [...] s'adapter aux changements de cible et [...] anticiper des instruments politiques internationaux et se mailler avec eux » [traduction libre] (Jaccard et Rivers, 2008). Certaines politiques sont intrinsèquement plus adaptatives que d'autres. Les opérateurs œuvrant sur le marché des permis d'émissions peuvent répondre immédiatement aux nouvelles informations sur les politiques climatiques, hausser ou baisser le prix des permis s'ils prévoient des changements en matière de politique gouvernementale ou de conditions du marché, alors que les politiques fiscales requièrent des interventions gouvernementales plus discrètes pour ajuster les prix (Goulder et Parry, 2008). Les politiques qui prescrivent l'utilisation d'une technologie donnée sont moins adaptatives, puisqu'elles verrouillent une approche. Dans un même temps, les entreprises et les consommateurs ont besoin d'une certaine certitude pour déterminer où investir (Newell *et al.*, 2013). L'incertitude politique actuelle peut les amener à continuer à prendre des mesures de réduction des émissions à court terme, comme investir dans l'efficacité énergétique, au lieu de se lancer dans des changements technologiques à long terme (Newell *et al.*, 2013). L'encadré 4.3 décrit les approches susceptibles de contribuer à la certitude politique. Le compromis entre adaptabilité et certitude requiert généralement d'envoyer un avertissement aux entreprises et aux consommateurs avant d'instaurer des changements politiques.

### Encadré 4.3

#### Instruments juridiques d'amélioration de la certitude politique

Certains instruments sont conçus pour être résilients face aux aléas politiques et offrent donc plus de certitude aux entreprises et aux individus, alors que d'autres sont plus temporaires et sont par conséquent moins enclins à motiver des changements d'investissement à long terme. Par exemple, le Royaume-Uni a adopté la *Climate Change Act* en 2008, qui fixe comme objectif la réduction des émissions de 80 % d'ici à 2050 par rapport au niveau de 1990 (CCC, s.d.). Cette loi du Parlement requiert du gouvernement qu'il établisse un budget carbone sur cinq ans qui augmente progressivement jusqu'à la cible de 2050 (CCC, s.d.), améliorant ainsi la certitude en ce qui concerne la rigueur de la cible et la probabilité que la politique perdure. La *Global Warming Solutions Act of 2006* adoptée par la Californie fixe également par loi des cibles d'émissions et oblige le California Air Resources Board à élaborer une réglementation stimulant la réduction des émissions (CARB, 2014). Une récente décision de justice rendue aux Pays-Bas a statué que le gouvernement devait intervenir pour garantir qu'un certain niveau de réduction des émissions est atteint à une date déterminée, en raison du devoir qu'il a de protéger ses citoyens (Schiermeier, 2015). Un tel jugement pourrait justifier que d'autres États prennent de nouvelles mesures politiques et accroître ou miner la certitude politique (Schiermeier, 2015).

## 4.4 POLITIQUES HABILITANTES

Les instruments politiques contraignants décrits ci-dessus peuvent stimuler une réduction des émissions à grande échelle dans l'économie. Cependant, les gouvernements peuvent aussi mener en parallèle de nombreuses politiques habilitantes importantes pour faciliter la réduction des émissions dans des secteurs particuliers et des activités précises. Ils peuvent appuyer la transition vers un Canada à faibles émissions grâce à des mesures de réévaluation des subventions, investir directement dans l'infrastructure habilitante, susciter la participation active des communautés, améliorer les processus réglementaires et soutenir l'écosystème de l'innovation.

### 4.4.1 Repenser les subventions

Les subventions aux sources énergétiques à faibles émissions peuvent encourager la réduction des émissions, tout comme l'élimination des subventions aux combustibles fossiles. Toutefois, leur efficacité environnementale peut varier. Par ailleurs, les aides à l'investissement à grande échelle récompensent tous les investissements, peu importe leurs résultats environnementaux (Linn et Richardson, 2013). De même, il se peut que certains individus ou entreprises

admissibles à une aide auraient décidé d'entreprendre le geste financé, même sans subvention ou mesure incitative. Les subventions sont largement employées pour encourager la production d'électricité renouvelable. Par exemple, les programmes de tarifs de rachat garanti (TRG) favorisent ce genre de production en établissant un prix garanti pour l'électricité sur une longue période, lequel est généralement supérieur au prix de l'électricité tirée du gaz naturel et du charbon forts émetteurs de dioxyde de carbone. Contrairement aux programmes classiques d'acquisition de la production d'électricité, ce type de mesure est accessible à de nombreux acteurs de petite envergure; même les foyers peuvent en bénéficier grâce à l'installation de panneaux solaires et la revente de leur électricité au réseau. Cette particularité peut aider à accroître la faisabilité politique et l'équité distributive de la mesure par rapport aux projets uniques de production électrique à grande échelle.

Cependant, l'expérience canadienne récente en ce qui concerne les subventions révèle qu'il est possible que le recours à ce type de politique soit très coûteux :

- Une évaluation des mesures incitatives en matière d'efficacité énergétique proposées par Ressources naturelles Canada dans le cadre du programme écoENERGIE Rénovation a montré qu'environ un quart des projets résidentiels et les trois quarts des projets des petites entreprises auraient été entrepris sans ce programme (RNCAN, 2010).
- Les prix élevés offerts pour certains types de projets d'électricité solaire par le programme de TRG en Ontario dépassaient considérablement le coût de solutions de substitution comme le charbon et le gaz naturel (même quand les coûts des impacts environnementaux, sur la santé et sur les changements climatiques étaient pris en compte) et d'autres énergies renouvelables (Deweese, 2012). De plus, l'introduction du programme de TRG a coïncidé avec une importante baisse du coût de l'énergie solaire photovoltaïque, mais le gouvernement a retardé l'ajustement des prix pour maintenir la confiance des investisseurs (BVG, 2011). Le prix élevé de l'électricité solaire se traduira par un vaste transfert de richesse des contribuables consommateurs d'électricité aux bénéficiaires du TRG (Pirnia *et al.*, 2011).

L'élimination progressive des subventions pour les sources d'énergie qui rejettent de forts volumes de dioxyde de carbone peut aider à soutenir la transition vers un système énergétique à faibles émissions. L'estimation de l'étendue des subventions aux combustibles fossiles au Canada donne des résultats extrêmement variables, à cause de la diversité des définitions du terme *subvention* et de la difficulté à accéder aux données pertinentes, mais l'ampleur de ces subventions baisse indubitablement (CEDD-BVG, 2012). La recherche estime que le gouvernement du Canada a fourni 508 millions de dollars en soutien direct entre 2007-2008 et 2011-2012, mais que plus de 95 %

de cette aide concernait la R-D — dont plus de la moitié ciblant l'amélioration du rendement environnemental des combustibles fossiles. Elle met aussi en évidence deux grandes dépenses fiscales : la déduction pour amortissement accéléré pour les projets de sables bitumineux, estimée à 1,5 milliard de dollars entre 2006-2007 et 2010-2011 (et qui a été éliminée depuis) et les déductions pour actions accréditatives<sup>33</sup> estimées à 1,9 milliard de dollars pour la même période (qui portent non seulement sur le pétrole et le gaz naturel, mais aussi sur l'extraction minière et les énergies propres) (CEDD-BVG, 2012). D'autres subventions sont offertes à l'échelle provinciale.

#### 4.4.2 Investissements gouvernementaux directs et infrastructure habitante

Les gouvernements fédéral et provinciaux et les administrations municipales disposent de nombreux bâtiments, d'une infrastructure et d'un équipement volumineux et d'une multitude d'employés. Ils peuvent instaurer des politiques qui influencent les émissions provenant de chacune de ces ressources et favoriser les réductions des émissions dans d'autres secteurs. Dans de nombreux cas, ils peuvent réduire directement les émissions de gaz à effet de serre en faisant en sorte que ces réductions soient un objectif accepté inclus dans les processus décisionnels concernant les approvisionnements publics. La *Politique d'achats écologiques* du gouvernement du Canada favorise les options d'achat qui produisent moins d'émissions durant leur cycle de vie (TPSGC, 2014). Les achats écologiques sont pertinents pour l'acquisition d'un éventail de biens, du papier aux véhicules, ainsi que pour les services et les travaux de construction. Le comité d'experts a relevé que ce type de politiques est plus efficace quand il démontre un leadership, tout en développant la capacité et en appuyant les améliorations, lesquelles peuvent ensuite être mises en œuvre dans d'autres secteurs de l'économie.

Les gouvernements provinciaux et les administrations municipales ont les moyens d'influer sur la réduction des émissions par leurs décisions de planification et de développement municipaux qui ont une incidence sur le modèle et le design urbains. Jaccard *et al.* (2012) soulignent le potentiel des gouvernements « [...] d'influencer l'évolution du modèle urbain par le zonage, la délivrance de permis d'exploitation, les exigences concernant le choix des sites, les codes du bâtiment et les investissements dans l'infrastructure de transport public, de production énergétique de quartier et même de collecte et d'élimination des déchets urbains liquides et solides » [traduction libre]. La ville de Vancouver a modifié ses règles de construction pour exiger des nouvelles habitations qu'elles rejettent seulement la moitié des gaz à effet de serre autorisés par le

---

33 Les actions accréditatives sont émises pour financer les travaux d'exploration et d'exploitation. Les investisseurs bénéficient de déductions fiscales et de crédit d'impôt (ARC, 2008).

code provincial et imposer des améliorations à l'efficacité énergétique dans les projets de rénovation (Ville de Vancouver, 2014). *Global Energy Assessment* a défini les « normes, codes et étiquetage relatifs aux bâtiments et aux électroménagers stricts, continuellement mis à jour et rigoureusement appliqués » au nombre des outils politiques les plus efficaces pour produire des économies d'énergie dans le secteur du bâtiment (Ürge-Vorsatz *et al.*, 2012).

La gestion communautaire de l'énergie (GCE), qui intègre l'aménagement urbain à la planification du système énergétique, pourrait aussi contribuer à la réduction des émissions. La GCE tient compte du fait que « le modèle urbain est un choix de politique publique [...] et la densification et l'utilisation communautaire intégrée de l'énergie ne peuvent se produire que si les politiques publiques à long terme municipales, provinciales et fédérales sont harmonisées avec ces objectifs » [traduction libre] (Jaccard & Assoc. *et al.*, 2010). Elle utilise une multitude d'outils politiques, dont la délivrance de permis d'exploitation, les codes du bâtiment, les subventions et les taxes, pour encourager la densification urbaine autour de nœuds de transport en commun, les quartiers à usage mixte et le chauffage de quartier. Contrairement aux taxes et aux systèmes de plafonnement et d'échange, les politiques de GCE entrent généralement en vigueur progressivement parce qu'elles concernent l'infrastructure à longue durée de vie. Ces politiques peuvent être économiquement attrayantes quand elles sont mises en place au moment où un bien doit être remplacé; elles ont même parfois un coût négatif (Jaccard & Assoc. *et al.*, 2010). Une modélisation canadienne effectuée pour le compte de l'organisme sans but lucratif QUEST (Quality Urban Energy Systems of Tomorrow) a révélé que la mise en application d'un ensemble de politiques de GCE rigoureuses, notamment en matière d'affectation des terres, de transport et de systèmes énergétiques de quartier, se solderait par une réduction des émissions de 12 % dans les secteurs du bâtiment et du transport de personnes d'ici à 2050 (Jaccard & Assoc. *et al.*, 2010).

Tous les ordres de gouvernement peuvent soutenir l'aménagement de l'infrastructure habilitante à l'échelle locale ou nationale. Nombre des technologies de réduction des émissions détaillées au chapitre 3 nécessitent une nouvelle infrastructure publique ou quasi-publique, en particulier pour les nouveaux véhicules, un réseau électrique de plus forte capacité et des canalisations d'acheminement du dioxyde de carbone. Le comité d'experts a constaté que le poids de l'habitude dans le système d'innovation, qui favorise les systèmes et technologies énergétiques existants (Grubler *et al.*, 2012a), combiné au caractère de bien public de la nouvelle infrastructure, met en lumière le rôle que pourraient jouer les gouvernements. En particulier, ils pourraient avoir une action temporaire cruciale sur l'aide à l'aménagement de l'infrastructure énergétique de substitution pour les nouveaux types de véhicules. Une fois cette infrastructure établie et l'utilisation de véhicules de

substitution répandue, les gouvernements pourraient cesser leur participation et la gestion de l'infrastructure serait alors confiée au secteur privé (comme c'est le cas pour l'actuelle infrastructure d'approvisionnement en essence).

#### 4.4.3 Faire participer les communautés et réglementer les sociétés d'énergie

Dans certaines situations, l'opposition de la communauté et le processus réglementaire peuvent décourager l'implantation de procédés à faibles émissions. Il s'agit d'un nouveau domaine de recherche et les projets d'énergie renouvelable constituent un bon exemple des dimensions qu'il peut avoir. L'acquisition d'autorisations pour de tels projets peut être une démarche onéreuse et l'opposition locale est susceptible de causer des retards et d'augmenter les coûts. Il peut être nécessaire de revoir la réglementation pour mieux soutenir le déploiement accru des énergies renouvelables tout en protégeant les communautés et l'environnement local (Mitchell *et al.*, 2011). Le GIEC note « le besoin de systèmes préventifs, positifs et qui tiennent compte du lieu et de l'échelle » [traduction libre] (Mitchell *et al.*, 2011). Jaccard *et al.* (2011) relèvent que les politiques sur les énergies renouvelables devraient prévoir la participation locale à la planification et trouver des façons d'équilibrer les inquiétudes locales et mondiales. Les préoccupations au sujet de l'emplacement peuvent également constituer un obstacle majeur à l'expansion et à l'amélioration du réseau, tout comme à la construction de pipelines. Confier la propriété des ressources énergétiques renouvelables à la communauté et prévoir des dispositions pour dédommager les personnes pénalisées peut aussi renforcer l'appui public (Mendonca *et al.*, 2009). Le soutien de la population au développement éolien a baissé au Danemark quand les turbines éoliennes, qui appartenaient à la communauté, ont été transférées à des propriétaires éloignés ou uniques (Mendonca *et al.*, 2009).

Les sociétés de services publics réglementées jouent un rôle essentiel dans l'actuel système énergétique et la manière dont elles sont réglementées peut favoriser le changement ou entraver la transition vers un futur à faibles émissions. Plusieurs obstacles sont susceptibles de les empêcher de promouvoir l'efficacité énergétique : elles peuvent ne pas être en mesure de recouvrer les coûts des programmes d'efficacité énergétique par l'ajustement des tarifs; les gains d'efficacité peuvent tirer à la baisse la demande de services énergétiques; et dans le cas de sociétés privées, il est possible que les actionnaires ne puissent pas récolter les fruits de leur investissement dans l'efficacité énergétique (contrairement à l'investissement dans l'approvisionnement énergétique) (Carter, 2001; NAPEE, 2007). Il existe diverses méthodes pour garantir que les sociétés de services publics réglementées sont récompensées non seulement parce qu'elles augmentent l'offre, mais aussi parce qu'elles éliminent complètement

la nécessité de l'augmenter. Au Vermont, Green Mountain Power prouve que les sociétés de services publics peuvent aussi être des leaders. Cette entreprise a mis sur pied un programme de rénovation domiciliaire dans lequel elle agit en partenariat avec des entrepreneurs pour définir et mettre en œuvre une série de mesures d'économie d'énergie et offre des services de location de thermopompes au lieu de demander aux propriétaires d'assumer d'emblée l'ensemble des coûts (GMP, 2015; McKibben, 2015). Une telle stratégie peut aider à surmonter les obstacles à l'action individuelle, et les technologies qui réduisent la demande de pointe peuvent permettre aux sociétés de services publics de faire des économies.

Le comité d'experts a constaté que les organismes de réglementation de l'énergie peuvent apporter une précieuse contribution à la transformation du système énergétique en raison du fait qu'ils se concentrent sur le long terme, de leur aptitude à intégrer les coûts externes dans les tarifs énergétiques et à répondre aux craintes concernant l'équité et à l'indépendance des processus réglementaires quasi-judiciaires. Ces réflexions laissent entrevoir que le rôle de ces organismes pourrait devenir un intéressant sujet d'étude.

#### **4.4.4 Soutenir l'écosystème de l'innovation**

Les progrès technologiques permettent l'implantation généralisée des procédés actuels et peuvent mener au déploiement de nouvelles technologies qui réduisent les coûts de l'atténuation des émissions. Les politiques contraignantes, en particulier celles qui fixent des prix, encouragent souvent l'innovation en récompensant davantage la R-D fructueuse. D'autres politiques gouvernementales, qu'elles soient financières ou autres, peuvent aller plus loin en soutenant divers éléments de l'écosystème de l'innovation (de la R-D préliminaire aux projets pilotes, en passant par le déploiement et la croissance de l'entreprise), à la fois par l'encouragement de la recherche et par l'amélioration des perspectives de commercialisation des nouvelles technologies. Ces politiques supplémentaires ne sont qu'occasionnellement rentables, mais ce n'est pas une surprise, puisque l'innovation est par définition risquée. Une percée peut faire plus que compenser de nombreux projets infructueux. Toutefois, cette incertitude souligne l'importance d'associer les politiques d'aide à l'innovation à des politiques contraignantes pour parvenir à la baisse des émissions.

En raison de plusieurs défis propres à l'innovation, les politiques gouvernementales peuvent apporter leur aide, notamment en matière de dépenses. Comme nous le notons précédemment, l'innovation se heurte à une lacune importante du marché : l'incapacité des entreprises à profiter de tous les avantages économiques de l'innovation fait en sorte que l'investissement n'y est pas optimal. Les entreprises font face à d'immenses obstacles pour l'accès

au financement entre la première phase de R-D de la conception d'un produit et sa commercialisation finale, ce qu'on appelle couramment la *vallée de la mort* (CAC, 2009). L'accès au financement peut être particulièrement difficile pour les concepteurs de technologies à faibles émissions, pour lesquelles le marché dépend des politiques gouvernementales d'atténuation et les investisseurs peuvent être peu familiers avec ces types de produits et donc les considérer comme des investissements trop risqués (Justice, 2009).

Il existe d'autres barrières, comme le volume d'immobilisation requis par les technologies énergétiques et le long délai séparant la conception de la commercialisation (SEF Alliance, 2008). Enfin, certains chercheurs affirment qu'une grande partie des procédés et technologies (p. ex. le CSC ou les VEB) nécessaires pour réduire de façon étendue les émissions afin de limiter le réchauffement planétaire à 2 °C ne sont pas prêts à être implantés à grande échelle (Hoffert *et al.*, 2002; Grubler *et al.*, 2012a; Sachs *et al.*, 2014; Loftus *et al.*, 2015). Ce constat a conduit des universitaires à conclure que les politiques technologiques devaient être le principal instrument de la réaction aux changements climatiques, les recettes de la taxe sur le carbone ou des enchères du système de plafonnement et d'échange servant à intensifier les efforts mondiaux visant à concevoir des solutions technologiques rentables (Galiana et Green, 2010).

À condition que les nouvelles options réduisent les coûts de la réduction des émissions, la technologie constitue aussi un moyen d'appliquer des politiques contraignantes de plus en plus rigoureuses (Victor, 2011). Un groupe d'universitaires du Royaume-Uni a récemment lancé le Global Apollo Programme, un projet cherchant à découvrir des manières de produire de l'énergie non émettrice de dioxyde de carbone à des coûts moindres que les combustibles fossiles (King *et al.*, 2015). De son côté, Bill Gates a récemment annoncé qu'il prévoyait investir 2 milliards de dollars dans les technologies de production d'énergie renouvelable au cours des cinq prochaines années, dans le but de trouver des solutions à faible coût (Adams et Thornhill, 2015). Cependant, les avancées technologiques et les politiques sur les changements climatiques peuvent aussi faire baisser graduellement le prix des combustibles fossiles, ce qui pourrait miner cette stratégie (Sinn, 2008).

Les politiques gouvernementales peuvent encourager l'innovation quand elles portent sur l'environnement réglementaire, la situation macroéconomique, l'accès à la finance, la protection des droits de propriété intellectuelle, le commerce et l'accès aux travailleurs qualifiés. Les politiques d'innovation efficaces suivent une approche globale qui assure un soutien à l'ensemble de l'écosystème de l'innovation (Grubler *et al.*, 2012a). Gallagher *et al.* (2012)

relèvent l'importance de disposer d'un ensemble de politiques d'innovation énergétique qui « aident au perfectionnement des connaissances, aux rétroactions et à l'apprentissage dans l'intégralité du système de l'innovation » [traduction libre] et qui ciblent également l'innovation sociale, soit « les changements en matière d'adoption, d'utilisation et d'adaptation des technologies dans un contexte social et institutionnel » [traduction libre]. Les gouvernements peuvent aussi stimuler la collaboration dans l'industrie afin que des personnes se regroupent pour travailler à des objectifs communs. Par exemple, le Réseau de centres d'excellence du Canada, un programme du gouvernement fédéral, a financé des initiatives comme Auto 21, qui favorise la recherche automobile dans divers domaines, et BiocarburantNet, qui porte sur l'amélioration de la chaîne de production des biocarburants (RCE, 2015).

Les politiques d'innovation canadiennes prennent généralement la forme d'une subvention ou d'une mesure incitative fiscale ou de la participation directe au développement gouvernemental en laboratoire. Dans le *Specified Gas Emitters Regulation* albertain, le soutien à l'innovation est un élément du système d'échange axé sur l'intensité des émissions : les entreprises peuvent verser 15 \$ par tonne d'émissions dépassant la cible au Climate Change and Emissions Management Fund de la province. Ce fonds finance des projets d'aide à la réduction des émissions, notamment dans les domaines prioritaires de l'efficacité énergétique, du CSC et de l'écologisation de la production énergétique (CCEMC, 2013). Jusqu'en 2013, plus de 200 millions de dollars avaient ainsi été distribués à des projets situés sur l'ensemble du spectre de l'innovation, principalement à des initiatives au stade du projet pilote sur le marché ou de la commercialisation (CCEMC, 2013). Le fonds devrait entraîner une réduction des émissions de 10,2 Mt d'ici à 2020 (CCEMC, 2013). Le financement public peut être un important complément au financement privé classique, en assurant de l'argent sur de plus longues périodes, en acceptant un plus fort risque technologique et en intervenant à des étapes plus précoces au bénéfice de plus petites entreprises qui pourraient être trop risquées pour les investisseurs privés. Par exemple, le Fonds de technologies du DD de Technologies du développement durable Canada (TDDC), doté de 915 millions de dollars, finance les projets de précommercialisation à la suite d'un processus de sélection à l'investissement rigoureux (TDDC, 2015b). Selon TDDC, « 66 projets terminés fin 2014 ont enregistré une réduction effective des GES équivalent à près de 4,5 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> » (TDDC, 2015a). Les revenus générés par les entreprises appuyées par TDDC étaient estimés à 1,1 milliard de dollars en 2014, ce qui correspondait à la création de 500 emplois directs et indirects cette année-là (TDDC, 2015c). Les projets de TDDC ont obtenu un substantiel soutien du secteur privé; l'OCDE a cité l'approche de TDDC du développement de projets comme un exemple de stratégie efficace pour promouvoir les partenariats public-privé et l'éco-innovation (OCDE, 2011).

#### 4.4.5 Choisir les politiques habilitantes

Les politiques habilitantes peuvent constituer des compléments importants aux politiques contraignantes décrites à la section 4.3. Il est possible d'utiliser une approche systémique pour analyser l'interaction et la complémentarité des différentes combinaisons de politiques sur le carbone. Par exemple, si un règlement sur l'efficacité énergétique aide à surmonter les obstacles au progrès, comme le décalage entre les personnes qui payent pour les améliorations à l'efficacité énergétique et celles qui en bénéficient, il pourrait aussi abaisser les coûts à l'échelle de l'économie de la réduction des émissions. De même, des investissements publics dans l'accroissement de la capacité du réseau électrique peuvent être nécessaires pour accueillir la production d'électricité renouvelable à certains endroits. Ajouter la tarification du carbone aux politiques habilitantes aide à niveler les chances entre les sources d'énergie et peut accélérer la réduction des émissions. En même temps, comme les politiques peuvent avoir des effets négatifs les unes sur les autres et que leur coût administratif est parfois considérable, déployer un large éventail de politiques visant la réduction des émissions peut être contre-productif. Les gouvernements doivent donc faire preuve de stratégie quand ils étudient la combinaison de politiques qui sera la plus avantageuse dans leur situation.

### 4.5 LES POSSIBLES RÉPERCUSSIONS ÉCONOMIQUES DE LA TRANSITION VERS UN SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE À FAIBLES ÉMISSIONS AU CANADA

La réduction des émissions n'est pas dénuée de coûts, quelle qu'en soit l'échelle — pour les entreprises, les secteurs d'activité, les pays ou la planète. Toutefois, s'il y met tout le soin voulu, le Canada pourrait implanter des politiques climatiques bien plus musclées et efficaces que celles mises en œuvre jusqu'ici, sans nuire au bien-être économique du pays. Selon les meilleures données probantes disponibles, il est possible d'adopter des politiques qui mèneront à une baisse notable de nos émissions de gaz à effet de serre dans les dix prochaines années et mettront la table pour une réduction encore plus marquée dans les décennies suivantes, sans imposer de coûts ingérables à la majorité des consommateurs et des entreprises ou mettre en péril la croissance économique à long terme. Lorsque des régions, des secteurs ou des individus sont touchés de manière disproportionnée, il existe des façons de les compenser durant la transition.

#### Répercussions sur les consommateurs et les entreprises

Une politique stricte sur les changements climatiques a de fortes probabilités d'accroître les coûts de l'électricité dans de nombreuses régions du pays. Cependant, comme il est noté à la section 3.1.3, une électricité à faibles émissions est actuellement offerte partout au Canada pour un supplément de

2,5 ¢/kWh, et l'accroissement du prix de l'électricité provenant des sources énergétiques à faibles émissions ne mettrait pas le Canada dans une position bien différente des autres pays industrialisés<sup>34</sup>.

Les coûts de transport augmenteraient également. Les véhicules hybrides rechargeables coûtent actuellement autour de 7 000 \$US plus chers à fabriquer que les véhicules à essence (NRC, 2013). Cet écart peut être partiellement recouvert, puisque les dépenses d'utilisation des véhicules électriques en Amérique du Nord sont généralement bien plus faibles que celles des véhicules à essence (NRC, 2013; DOE, 2015a). Selon l'utilisation du véhicule, ces économies peuvent déjà dépasser le supplément de prix d'achat<sup>35</sup>. En Colombie-Britannique, l'imposition d'une taxe sur le carbone de 30 \$/tonne s'est traduite par une hausse de 7 ¢/litre du prix de l'essence (Gouv. de la C.-B., n.d.c). Si l'on suit le même principe, une taxe sur le carbone de 100 \$/tonne entraînerait une augmentation de 23 ¢/litre. L'ampleur de cette variation n'est pas très différente des fluctuations que subit le prix courant de l'essence au cours d'une année (Statistique Canada, 2015). Il a par exemple connu des écarts particulièrement grands récemment : à Toronto en 2014, le prix de détail moyen mensuel du litre d'essence ordinaire sans plomb a varié de 1,04 à 1,40 \$.

Comme toutes les politiques, les politiques climatiques créent des gagnants et des perdants. Les nouvelles entreprises proposant des technologies propres pourraient profiter d'une croissance de la demande pour leurs produits et services. L'AIE estime que la croissance mondiale de la production d'électricité renouvelable sera de 50 % entre 2013 et 2020 (AIE, 2014c). Les sources renouvelables devraient représenter près de 80 % de la nouvelle capacité de production d'électricité des pays de l'OCDE à la fin de cette période (AIE, 2014c). En revanche, les régions qui dépendent plus intensivement des secteurs gros consommateurs d'énergie, et celles dont les réseaux électriques sont de forts émetteurs de dioxyde de carbone, feront face à des coûts supérieurs à la moyenne quand elles passeront à des sources d'énergie à faibles émissions. Si le Canada devait mettre en place une politique climatique plus stricte que ses partenaires commerciaux, la compétitivité des secteurs gourmands en énergie et dépendants des échanges commerciaux, comme l'industrie pétrolière et gazière, la fabrication de fer et d'acier, de ciment, d'aluminium et de pâtes et

34 Le coût de l'électricité varie au pays. Son tarif est particulièrement bas à Montréal et à Winnipeg, mais bien plus élevé à Halifax et Toronto, notamment (Hydro-Québec, 2014).

35 Le département de l'Énergie des États-Unis propose un outil Internet de comparaison du coût de propriété cumulatif des solutions actuelles de substitution avec celui des véhicules conventionnels, selon des paramètres comme le prix d'achat, les coûts de carburant, les autres frais de fonctionnement et l'utilisation du véhicule. Voir <http://www.afdc.energy.gov/cal>.

papers et certains secteurs de la fabrication de produits chimiques pourraient subir des effets négatifs (TRNEE, 2011). Cependant, il est possible d'élaborer les politiques de façon qu'elles répondent en partie aux inquiétudes distributives.

### Répercussions à l'échelle de l'économie

L'expérience de la Colombie-Britannique montre que les répercussions à l'échelle de l'économie de la taxe sur le carbone sont gérables. Après analyse, le gouvernement provincial a constaté que la taxe n'avait eu qu'une faible incidence négative sur le PIB (MFCB, 2013). Par contre, l'étude du taux de croissance du PIB par habitant de la province a révélé qu'entre 2008 et 2011, le rendement de la Colombie-Britannique avait été légèrement supérieur à celui de l'ensemble du pays, ce qui indique que la taxe n'a pas empêché la province de suivre le rythme du reste de l'économie canadienne (Elgie et McClay, 2013).

La réduction de la consommation de combustibles fossiles peut aussi avoir de substantiels avantages conjoints. La décision de l'Ontario d'abandonner la production électrique au charbon s'est probablement soldée par d'importantes économies en dépenses de santé causées par la pollution de l'air. Un rapport commandé par le ministère de l'Énergie de l'Ontario a estimé que l'élimination des centrales au charbon dans la province et leur remplacement par une combinaison de centrales nucléaires et au gaz naturel éviterait environ 660 décès prématurés, 920 admissions hospitalières et 1 090 visites aux urgences par année (DSS et RWDI, 2005). Cette mesure ferait donc économiser des frais dus aux soins de santé, à la perte de productivité, à la douleur et à la souffrance et au risque de mortalité prématurée, dont le montant est estimé à plus de 3 milliards de dollars. La transition de la production d'électricité du charbon au gaz naturel provoquerait une baisse de 90 % de ces dommages, qui ne seraient plus que de 388 millions de dollars (DSS et RWDI, 2005).

Les modèles économiques apportent d'autres preuves des retombées possibles de contraintes plus rigoureuses concernant les émissions. La modélisation d'un processus de décarbonisation ambitieux pour le Canada montre que d'ici à 2050, le pays pourrait réduire ses émissions de 90 % par rapport au niveau de 2010 tout en maintenant une croissance économique forte (Bataille *et al.*, 2014). Une analyse réalisée en 2009 par la Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie a estimé que les émissions pouvaient être abaissées de 65 % au-dessous du niveau de 2006 d'ici à 2050 pour le prix d'une petite baisse seulement de la croissance canadienne (TRNEE, 2009). Cette conclusion correspond largement aux résultats de la modélisation internationale effectuée à partir de scénarios dans lesquels est entreprise une action économique mondiale à bon rapport coût-efficacité (Nordhaus, 2013; GIEC, 2014e). Les données probantes indiquent aussi que les politiques permettant un changement lent,

par le remplacement des immobilisations à mesure qu'elles atteignent leur fin de vie utile, peuvent être moins coûteuses que celles dont l'effet se fait sentir rapidement et qui exigent un remplacement prématuré des immobilisations (TRNEE, 2011).

À l'échelle mondiale, l'AIE rapporte une dissociation de la croissance économique et des émissions de dioxyde de carbone en 2014 (AIE, 2015b). Elle note que « l'économie mondiale a crû d'environ 3 % en 2014, mais les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) d'origine énergétique sont restées constantes, c'est la première fois en 40 ans qu'un tel résultat se produit en dehors d'une crise économique » [traduction libre], mais elle ajoute que des données annuelles supplémentaires sont nécessaires pour confirmer si ce phénomène est anormal ou pas. Près de la moitié de la capacité de production d'électricité ajoutée en 2014 provenait de sources renouvelables, le coût de ces sources ayant baissé par rapport au coût des sources fossiles (AIE, 2015b).

### Stratégies de réduction des répercussions économiques négatives

Le comité d'experts a répertorié plusieurs dispositions qui pourraient minimiser les répercussions économiques négatives des politiques sur les changements climatiques :

- Prévoir les effets néfastes et concevoir des mesures pour les adoucir ou les éliminer;
- Prévoir de la flexibilité pour que les stratégies de réduction des émissions les moins coûteuses puissent être appliquées en premier;
- Mettre l'accent sur les stratégies de réduction des émissions qui créent des avantages conjoints (comme l'amélioration de la qualité de l'air découlant de la baisse de l'utilisation des combustibles fossiles en milieu urbain) et évitent les effets secondaires (comme l'amointrissement de la résilience du réseau électrique consécutif au recours excessif aux sources intermittentes);
- Élaborer des politiques faisant en sorte que les investissements de grande ampleur coïncident avec le roulement naturel des immobilisations.

## 4.6 RÉSUMÉ

Les politiques en vigueur au Canada ne sont pas suffisamment rigoureuses ou étendues dans leur couverture pour inciter à une transition vers une économie à faibles émissions. De nouvelles politiques contraignantes sont nécessaires pour produire une importante réduction des émissions au pays. Toutefois, le travail a déjà commencé. En 2015, un tiers de la population canadienne vit déjà dans une province qui a fixé un prix au carbone pour les émissions produites par les combustibles fossiles. Si l'Ontario met en place un système d'échange comparable à celui du Québec, les trois quarts des Canadiens vivront dans une région où le carbone est tarifé.

Des politiques de tarification du carbone à l'échelle de l'économie (taxe sur le carbone ou systèmes de plafonnement et d'échange) ou une série de règlements souples appliqués plus strictement pourraient créer les conditions nécessaires au changement. Les avantages de la tarification du carbone sont bien connus et comprennent un rapport coût-efficacité élevé et la possibilité de limiter le fardeau administratif. Cependant, la controverse politique et les inquiétudes au sujet des répercussions distributives entravent l'établissement de mécanismes rigoureux de fixation du prix. Une réglementation flexible est plus facilement acceptable et peut être pensée de façon à offrir la majeure partie des avantages des mécanismes de tarification, mais elle peut être plus coûteuse pour l'économie. Quelles que soient les politiques contraignantes adoptées, les gouvernements peuvent encore favoriser la réduction des émissions grâce à des politiques habilitantes adéquates. Les décisions d'achat gouvernementales, un aménagement urbain qui limite les émissions, le soutien à l'innovation, la fourniture d'une infrastructure habilitante, et des ajustements aux subventions, à la planification énergétique et aux processus réglementaires peuvent eux aussi stimuler une plus grande réduction des émissions dans différents segments de l'économie. Si la baisse des émissions de gaz à effet de serre au Canada ne sera pas sans effet sur l'économie, les données probantes portent à croire que des politiques bien conçues peuvent entraîner une diminution majeure sans pour autant menacer la croissance économique.

# 5

## Conclusions

- **Le contexte canadien de réduction des émissions de dioxyde de carbone produites par la consommation d'énergie**
- **Les possibilités technologiques de la mise en place d'un système énergétique à faibles émissions au Canada**
- **Politiques stimulant la transition vers un système énergétique à faibles émissions**
- **En conclusion**

## 5 Conclusions

La production d'énergie à partir des combustibles fossiles a été essentielle aux avancées technologiques et économiques des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles. Ces combustibles ont contribué à de formidables progrès du niveau de vie dans les pays industrialisés et continuent à aider à alléger la pauvreté dans les pays à faibles revenus. Cependant, leur combustion accroît la teneur en dioxyde de carbone de l'atmosphère et cause des changements généralisés du climat de la Terre. Les risques que de tels changements font subir aux systèmes naturels et aux collectivités humaines sont de plus en plus évidents. Atténuer ces risques exige une réduction soutenue des émissions de gaz à effet de serre absolues découlant de l'activité humaine, notamment une transition complète aux sources et aux technologies énergétiques à faibles émissions.

Le comité d'experts avait pour mandat de synthétiser les données probantes récentes sur les sources et technologies énergétiques et sur les politiques publiques susceptibles de permettre une telle transition au Canada. Le présent chapitre résume ses principales observations et conclusions.

### 5.1 LE CONTEXTE CANADIEN DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE DIOXYDE DE CARBONE PRODUITES PAR LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE

Le Canada, comme de nombreux autres pays, dépend actuellement des combustibles fossiles pour la majeure partie de ses besoins en énergie. Le charbon, le pétrole et le gaz naturel constituent 72 % de l'approvisionnement en énergie primaire du pays (somme de la production nationale et des importations, moins les exportations) (AIE, 2014b). Ces combustibles fournissent la presque totalité de l'énergie utilisée dans les réseaux de transport (routiers, aériens et maritimes) canadiens, la majorité de l'énergie nécessaire au chauffage des bâtiments et aux procédés industriels ainsi que la majeure partie de l'électricité produite en Alberta, en Saskatchewan, en Nouvelle-Écosse et au Nouveau-Brunswick. Leur combustion rejette d'énormes volumes de dioxyde de carbone. En 2013, le Canada se classait au 12<sup>e</sup> rang mondial en matière d'émissions totales de dioxyde de carbone et représentait 1,4 % du total mondial (Boden *et al.*, 2013). Il était également 4<sup>e</sup> des pays de l'OCDE en ce qui concerne les émissions de dioxyde de carbone par habitant (Banque mondiale, 2015).

Malgré une série de cibles nationales de réduction des émissions, les émissions de gaz à effet de serre du Canada ont notablement augmenté par rapport au niveau de 1990, principalement à cause du dioxyde de carbone rejeté par l'extraction et la consommation d'énergie. Les gouvernements ont adopté un

éventail de politiques climatiques pour contrer ce phénomène, notamment des mesures réglementaires sectorielles à l'échelle fédérale et des politiques de tarification du carbone fondées sur le marché, comme des taxes et des systèmes d'échange, dans plusieurs provinces. Toutefois, ces politiques ne sont encore que modérément strictes et comportent peu de pénalités financières pour le rejet de dioxyde de carbone; par conséquent, les émissions n'ont pas notablement baissé à l'échelle nationale. Le Canada affiche une forte consommation d'énergie par habitant à cause du niveau de vie élevé, des prix faibles de l'énergie en raison de l'abondance des ressources énergétiques nationales, de son climat variable et de sa vaste masse terrestre.

L'électricité, le transport, le bâtiment et l'industrie sont tous de grands émetteurs, mais la dynamique est différente d'un secteur à l'autre. Les émissions de la production électrique ont baissé ces dernières années en raison de choix politiques délibérés dans des provinces comme l'Ontario, qui a fermé ses centrales au charbon en 2014, alors que les émissions rejetées par le bâtiment sont stables depuis un moment. À l'opposé, le transport et l'industrie sont d'importantes sources de croissance des émissions. Celles du transport augmentent en raison de la hausse du nombre de kilomètres parcourus et de l'expansion du transport de marchandises. Les émissions industrielles sont généralement dominées par l'accroissement de l'exploitation des sables bitumineux, un problème unique au Canada. Les exportations de pétrole tiré de cette ressource ont pris de plus en plus d'importance dans l'économie canadienne, et les émissions ont augmenté avec la production : ce secteur est responsable de 42 % de la hausse totale des émissions canadienne entre 1990 et 2013 (Environnement Canada, 2015c). La future production à partir des sables bitumineux et les émissions qu'elle rejettera dépendront de la politique canadienne et de l'évolution de la situation du marché mondial du pétrole, ainsi que de l'innovation technologique et de l'ajustement des politiques mondiales.

Le Canada est riche en ressources naturelles et en moyens de production d'énergie et il dispose d'une expertise technologique qui peut faciliter le passage aux sources et technologies énergétiques à faibles émissions. La présence d'un réseau électrique à émissions relativement faibles dans de nombreuses provinces, associée à d'immenses possibilités de développement des énergies renouvelables et du nucléaire et à la mise en application des procédés de CSC, peut aider à décarboniser la production d'électricité dans tout le pays. Les transitions énergétiques à grande échelle prennent habituellement de nombreuses décennies, à cause de la longévité des immobilisations utilisées. Cependant l'expérience du Canada et d'autres pays montre que des transitions énergétiques plus restreintes ou plus ciblées peuvent, avec l'appui du gouvernement, se dérouler plus rapidement et aboutir à une réduction considérable des émissions

sur une période relativement courte. Selon le comité d'experts, aucun obstacle technologique ne limite la possibilité d'un futur à faibles émissions au Canada d'ici à plusieurs décennies *si* les politiques deviennent plus rigoureuses et sont associées à des mesures efficaces.

## **5.2 LES POSSIBILITÉS TECHNOLOGIQUES DE LA MISE EN PLACE D'UN SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE À FAIBLES ÉMISSIONS AU CANADA**

Le Canada peut bâtir un futur énergétique à faibles émissions s'il profite d'un certain nombre d'occasions déterminantes de réduire ses rejets, comme celles répertoriées au tableau 5.1. Ces occasions constituent un ensemble de stratégies de réduction et de choix énergétiques et technologiques prometteurs pour le Canada, qui reposent en grande partie sur des technologies commerciales existantes. Bien que ces possibilités influeront sur les nombreuses façons de produire et de consommer de l'énergie, elles n'exigent pas de repenser de fond en comble les systèmes énergétiques, malgré la prédominance actuelle des combustibles fossiles. Les stratégies et procédés mis en évidence représentent, de l'avis du comité d'experts, des occasions substantielles de réduire les émissions du système énergétique. De nouvelles évolutions technologiques ou socioéconomiques pourraient modifier ce point de vue et favoriser d'autres choix, mais étant donné le nombre de sources et de technologies énergétiques de substitution disponibles, la possibilité de réaliser de vastes réductions des émissions au Canada et dans d'autres pays demeure pour de multiples scénarios technologiques. Les résultats des précédents exercices de modélisation révèlent qu'un ensemble d'options semblables à celles décrites au tableau 5.1 pourraient permettre au Canada de réduire les émissions de dioxyde de carbone d'origine énergétique de 60 à 90 % d'ici au milieu du siècle (voir, par exemple, TRNEE, 2009; Riahi *et al.*, 2012; Bataille *et al.*, 2014), conformément aux cibles fédérales et à l'objectif récemment annoncé du G7 de décarboniser l'économie mondiale pour la fin du siècle (G7, 2015).

Tableau 5.1

**Possibilité de réduire les émissions d'origine énergétique au Canada**

<b>Électricité</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remplacement des centrales au charbon en Alberta, Saskatchewan, Nouveau-Brunswick et Nouvelle-Écosse par des solutions à faibles émissions.</li> <li>• Expansion de la capacité de production à faibles émissions dans toutes les provinces.</li> <li>• Investissement dans les réseaux de transport et de distribution électriques et dans le stockage de l'énergie pour faciliter une plus grande intégration de l'électricité à faibles émissions.</li> </ul>
<b>Transport</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gains d'efficacité dans tous les modes de transport.</li> <li>• Recours accru aux véhicules électriques pour le transport léger de voyageurs.</li> <li>• Expansion de l'utilisation des biocarburants dans le transport de marchandises et de la capacité de production et de distribution des biocarburants.</li> <li>• Aménagement urbain, planification de l'affectation des terres et investissements dans l'infrastructure cohérents avec des réseaux de transport à faibles émissions efficaces.</li> </ul>
<b>Bâtiment</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gains d'efficacité dans les nouveaux édifices coïncidant avec les travaux de rénovation.</li> <li>• Passage à l'électricité pour le chauffage dans les édifices à forte efficacité énergétique.</li> <li>• Adoption sélective de systèmes de chauffage de quartier à faibles émissions alimentés par de l'énergie renouvelable et la cogénération.</li> </ul>
<b>Industrie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gains d'efficacité dans tous les secteurs d'activités.</li> <li>• Réduction des émissions fugitives de méthane de l'industrie pétrolière et gazière.</li> <li>• Mise en pratique du captage et stockage du carbone dans les procédés industriels adaptés.</li> <li>• Électrification et utilisation de la biomasse dans les applications industrielles adaptées.</li> </ul>

L'électricité à faibles émissions est fondamentale pour un système énergétique à faibles émissions. Le Canada bénéficie déjà de forts volumes d'une telle électricité issue de l'énergie hydraulique et nucléaire et la puissance de production installée de l'énergie éolienne et solaire augmente rapidement. Le Canada accumule également de l'expérience sur les technologies de CSC, la première mise en application à grande échelle mondiale du CSC se déroulant à la centrale au charbon de Boundary Dam, en Saskatchewan. L'aménagement de réseaux électriques à faibles émissions dans tout le Canada nécessite l'abandon des sources fortement émettrices dans les provinces qui sont encore dépendantes d'elles. Il exige aussi l'extension de la production à partir de sources peu émettrices dans toutes les provinces pour encourager son emploi comme vecteur d'énergie dans tous les secteurs d'utilisation finale. Les émissions rejetées par le secteur de l'électricité au Canada sont en baisse à cause de l'élimination graduelle de la production à base de charbon. Cependant, cette transition pourrait être

accélérée avec l'exploitation de diverses sources d'énergie faiblement émettrices. Si le coût des technologies de production d'électricité à faibles émissions est encore généralement supérieur à celui des centrales à combustible fossile, il décroît rapidement. La maximisation de la réduction des émissions provenant des réseaux électriques demandera en fin de compte de limiter le rôle du gaz naturel à la fourniture d'électricité en période de pointe (ou d'adopter le CSC lorsque c'est faisable). De nouveaux investissements dans les réseaux de transport et de distribution électriques (p. ex dans des lignes de transport, dans les interconnexions ou dans les réseaux intelligents) et dans le stockage de l'énergie peuvent accélérer le recours à l'électricité à faibles émissions et l'expansion générale du réseau électrique, tandis que le recours croissant à l'énergie distribuée pourrait réduire les coûts et les pertes de transport.

Les réseaux de transport actuels sont dépendants des carburants d'origine pétrolière, qui sont avantageux sur le plan de la facilité de transport, de la densité énergétique et de la compatibilité avec l'infrastructure actuelle. Après avoir évalué les données probantes, le comité d'experts a conclu que l'amélioration de l'efficacité, l'utilisation accrue de l'électricité pour le transport de voyageurs par véhicules légers (probablement des VHR) et du biodiésel dans le transport de marchandises et un aménagement urbain et des investissements dans l'infrastructure judicieux constituent les stratégies les plus prometteuses à moyen et long terme pour réduire les émissions dans ce secteur. Des réductions sont possibles grâce à l'amélioration continue de l'efficacité des moteurs conventionnels à essence et diesel, à une hausse de l'emploi des véhicules hybrides et à la transition à des formes faiblement émettrices de transport. Le recours à l'électricité comme source d'énergie pour les véhicules de tourisme tire parti de l'infrastructure constituée par les réseaux électriques et de l'offre au Canada d'une électricité à faibles émissions. L'accroissement de la production (et de l'emploi) de biocarburants est cohérent avec l'énorme potentiel du pays à exploiter l'énergie de la biomasse et les limites de la faisabilité des autres carburants pour le transport de marchandises à longue distance. Les véhicules au gaz naturel sont également en mesure de permettre de modestes réductions des émissions de dioxyde de carbone dans le transport de marchandises par rapport au pétrole conventionnel. À long terme, l'aménagement urbain et les investissements dans les réseaux de transport public et dans une nouvelle infrastructure de ravitaillement peuvent jouer un rôle de soutien en encourageant la transition à des modes de transport moins émetteurs.

Dans le secteur du bâtiment, les gains d'efficacité substantiels associés à l'électrification — en particulier pour le chauffage — sont cruciaux. Le chauffage est responsable de la majorité des émissions de gaz à effet de serre dans les édifices au Canada, et le passage au chauffage électrique est l'avenue la plus

prometteuse pour réduire ces émissions. Toutefois, substituer l'électricité peut se révéler excessivement coûteux sans de larges gains d'efficacité découlant de l'amélioration de l'enveloppe des bâtiments (surtout par un emploi plus intensif de l'isolation et du chauffage solaire passif) et du remplacement des chaudières traditionnelles par des thermopompes. Il est aussi possible d'obtenir l'accroissement de l'efficacité et la réduction des émissions par l'adoption des centrales de cogénération et de systèmes de chauffage de quartier alimentés par de l'énergie renouvelable, des déchets ou des ressources telles que de l'eau de lacs profonds, quand c'est possible.

Réduire les émissions issues de la production d'énergie dans l'industrie est compliqué par la diversité des applications, procédés et technologies industriels. La principale difficulté dans l'industrie consiste souvent à déterminer des moyens faiblement émetteurs et économiques de produire de fortes chaleurs. La réduction de l'utilisation de l'énergie pour la transformation des matières premières, par exemple par l'utilisation accrue de solvants au lieu de la chaleur, pourrait contribuer à l'amélioration de l'efficacité dans l'industrie (en particulier dans le domaine des sables bitumineux). De plus, surveiller et réparer les fuites de gaz et réduire la mise à l'air libre et le torchage des émissions fugitives pourrait aider à réduire les émissions dans l'industrie pétrolière et gazière. L'électrification et le recours au CSC sont aussi des stratégies envisageables. L'électricité peut être utilisée comme source d'énergie dans de nombreux procédés industriels, le principal obstacle étant généralement le surcoût par rapport au gaz naturel. Le CSC est déjà employé dans des secteurs d'activité qui rejettent des flux relativement purs de dioxyde de carbone. Il pourrait, dans le futur, servir à réduire les émissions de diverses industries canadiennes grâce à l'exploitation des possibilités de séquestration offertes par les réservoirs de pétrole et de gaz épuisés à proximité ou par des formations salines. La biomasse joue déjà un rôle important dans certains secteurs, comme les pâtes et papiers, mais elle pourrait être utilisée également ailleurs.

La réduction des émissions peut s'amorcer immédiatement dans tous les secteurs, mais son rythme variera en fonction des dispositifs et des immobilisations concernés. Le renouvellement des immobilisations définit le moment le moins coûteux de la réduction des émissions. Pour les immobilisations à grande longévité, telles que les édifices et les centrales électriques, réaliser la transition au coût le plus bas possible exige de commencer immédiatement à atténuer les émissions et de remplacer les immobilisations à la fin de leur vie utile. Il existe certaines conditions complémentaires; par exemple, réduire les émissions dans le transport, le bâtiment et l'industrie dépend en partie de la disponibilité de l'électricité à faibles émissions. Cependant, même quand la production d'électricité n'est que partiellement décarbonée, des investissements dans

l'électrification dans ces secteurs peuvent améliorer le potentiel de réduction des émissions. Les gains d'efficacité peuvent aussi jeter les bases de la substitution interénergétique, par exemple, en rendant le chauffage à l'électricité dans les bâtiments à haute efficacité bien plus abordable. Les gestes individuels pour réduire les émissions peuvent aussi requérir des gouvernements qu'ils s'attaquent aux obstacles systémiques à l'adoption généralisée des technologies énergétiques à faibles émissions.

Les possibilités recensées tout au long de cette section dépendent largement de technologies proposées dans le commerce, dont beaucoup ont largement été déployées dans des systèmes énergétiques ces dernières années. Bien que l'innovation puisse encore être nécessaire à l'application de ces technologies dans de nouvelles situations, aucun frein technologique substantiel n'empêche le Canada ou de nombreux autres États de réduire immédiatement leurs émissions. Des travaux de R-D et des progrès supplémentaires pourraient progressivement abaisser les coûts des technologies énergétiques à faibles émissions et favoriser la mise au point de nouveaux procédés permettant d'améliorer l'efficacité énergétique. Cependant, les entreprises et les individus ne choisiront pas des solutions à émissions faibles ou nulles à grande échelle sans politiques publiques rendant ces options plus concurrentielles sur le plan des coûts, soit par la tarification du carbone soit par la restriction des émissions de dioxyde de carbone.

Pour le moment, il existe de considérables obstacles économiques à l'implantation de telles technologies. Le coût supérieur des ressources à faibles émissions par rapport aux combustibles fossiles conventionnels, combiné aux contraintes systémiques posées par l'infrastructure énergétique existante, empêchera la réalisation de la plupart des possibilités recensées ci-dessus si des politiques d'atténuation plus rigoureuses ne sont pas mises en application.

### **5.3 POLITIQUES STIMULANT LA TRANSITION VERS UN SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE À FAIBLES ÉMISSIONS**

Le Canada aura besoin de politiques étendues, contraignantes et de plus en plus strictes pour établir un système énergétique à faibles émissions. Des politiques contraignantes reflétant les répercussions négatives des émissions de dioxyde de carbone peuvent influencer la prise de décision des entreprises et des individus et les inciter à abandonner les activités fortement émettrices. Par exemple, une taxe sur le carbone dans toute l'économie peut accroître le prix de l'essence pour les consommateurs, encourager la conception et l'achat de véhicules plus efficaces fonctionnant à une énergie de substitution, réduire l'utilisation de l'automobile et augmenter la demande en transport public. De même, un système de plafonnement et d'échange appliqué à l'industrie

pourrait renforcer l'usage de la biomasse et de l'électricité à faibles émissions comme source de chauffage, au détriment des combustibles fossiles. S'il adopte des politiques flexibles à l'échelle de l'économie, le gouvernement n'aura pas besoin de statuer sur les technologies gagnantes. Ce sont les individus et les décideurs dans les entreprises qui détermineront celles qui correspondent le mieux à leur situation et ils pourront modifier leur choix avec le temps pour l'adapter aux avancées scientifiques, aux tendances en matière d'émissions et aux évolutions technologiques.

Actuellement, les politiques sont un mélange d'initiatives fédérales et provinciales qui varient dans leur principe, leur couverture et leur rigueur. Bien que beaucoup d'entre elles puissent entraîner une réduction des émissions, elles ne sont pas suffisantes collectivement pour stimuler la transition vers un système à faibles émissions. Une réglementation fédérale en matière d'efficacité énergétique des véhicules de tourisme et des camions lourds, fondée sur le marché, favorisera des gains d'efficacité continus dans le transport routier et pourrait stimuler un recours accru aux véhicules électriques. Les émissions de gaz à effet de serre moyennes que les modèles de véhicules de tourisme de 2025 rejeteront seront approximativement la moitié de celles des modèles de 2008 (GC, 2014b). La norme sur l'électricité verte de Colombie-Britannique, une autre mesure réglementaire fondée sur le marché, exige que 93 % de la nouvelle production d'électricité ne rejette pratiquement pas d'émissions, mais propose aux fournisseurs d'électricité le choix de la forme d'énergie à utiliser pour répondre à cette contrainte, afin de favoriser une approche à moindre coût. La taxe sur le carbone britannico-colombienne de 30 \$/tonne envoie également un signal de prix cohérent pour presque toutes les sources d'émissions de combustibles fossiles dans de vastes segments de l'économie. Le système d'échange de l'Alberta limite l'intensité des émissions des grands émetteurs et offre aux entreprises une variété d'options de conformité, dont le versement à un fonds technologique de 15 \$ par tonne d'émissions dépassant la cible. Les nouvelles plates-formes d'échange d'émissions au Québec et en Ontario pourraient aussi jeter les bases d'une substantielle réduction des émissions. Ces mesures pourraient être de plus en plus rigoureuses et être combinées avec de nouvelles politiques visant d'autres secteurs et d'autres régions.

Les répercussions politiques varieront selon l'électricité et le secteur d'utilisation. Par exemple, la sensibilité au prix et la diversité technologique de l'industrie laissent penser qu'elle profiterait d'une tarification uniforme du carbone — que ce soit par le biais d'une taxe sur le carbone ou d'un système de plafonnement et d'échange. Dans le bâtiment, des obstacles institutionnels et relatifs à l'information peuvent limiter l'efficacité de la tarification du carbone, mais une réglementation coercitive, par exemple des normes d'amélioration de l'efficacité

énergétique, et la modification du code du bâtiment pourraient faire en sorte que les nouveaux édifices soient fortement écoénergétiques. Dans le transport, la tarification du carbone pourrait encourager les consommateurs à acheter des véhicules moins émetteurs, alors que des politiques réglementaires pourraient accroître l'utilisation de technologies ou de types de carburants particuliers et stimuler des gains d'efficacité continus. La tarification du carbone et les normes d'électricité propre pourraient toutes deux constituer des approches prometteuses pour le secteur de l'électricité. Cependant, la sensibilité de ce dernier aux signaux de prix dépend de la façon dont les sociétés d'électricité sont réglementées et de l'ampleur de la concurrence et des encouragements financiers afin que les actionnaires réduisent les émissions.

Une tarification du carbone à large portée, appliquée par l'entremise d'une taxe sur le carbone ou d'un système de plafonnement et d'échange, garantit que les mesures de réduction des émissions à coût moindre seront adoptées en premier, ce qui minimisera les coûts économiques globaux des politiques sur les changements climatiques. Toutefois, les approches réglementaires coercitives peuvent favoriser l'adoption simultanée de stratégies d'atténuation des émissions aux coûts de réduction extrêmement différents. Le choix de l'instrument politique dépendra du contexte et de l'importance relative de ses divers objectifs. Quand un instrument se heurte à des obstacles dans sa mise en œuvre, il peut être remplacé par d'autres outils réalisant des objectifs similaires.

Le tableau 5.2 résume les stratégies permettant d'ajuster les politiques contraignantes afin d'améliorer leur efficacité à l'égard d'objectifs essentiels, comme le coût, l'efficacité environnementale, l'équité, la faisabilité administrative et l'acceptabilité politique, quel que soit le type d'instrument choisi.

Tableau 5.2

**Élaboration de politiques afin de satisfaire les principaux critères d'évaluation**

Critères	Caractéristiques de conception
<b>Efficacité environnementale</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mettre en application des politiques contraignantes.</li> <li>• Renforcer progressivement les exigences de réduction des émissions.</li> <li>• Porter sur la plus grande partie de l'économie possible (à l'aide d'une ou de plusieurs politiques).</li> <li>• S'engager dans des politiques à long terme qui incitent les foyers et les entreprises à investir dans les changements.</li> </ul>
<b>Rapport coût-efficacité</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Offrir le choix des technologies et des formes d'énergie à utiliser pour répondre aux exigences de réduction des émissions.</li> <li>• Maximiser la capacité de concentrer les réductions des émissions dans les secteurs de l'économie où ces réductions seront les moins coûteuses.</li> <li>• Renforcer progressivement les exigences de réduction des émissions pour réduire les ajustements de coût.</li> <li>• S'engager dans des politiques à long terme qui incitent les foyers et les entreprises à investir dans les changements.</li> </ul>
<b>Équité distributive</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Déterminer les groupes qui risquent le plus de subir des effets négatifs.</li> <li>• Élaborer des politiques compensant les répercussions et les coûts initiaux pour les groupes, régions et secteurs fortement touchés.</li> <li>• Utiliser les leviers fiscaux pour compenser les effets régressifs de la politique dus à la hausse des prix pour les consommateurs.</li> <li>• Utiliser des mécanismes tels que l'ajustement des taxes aux frontières et l'harmonisation des politiques entre les provinces pour minimiser le déplacement des émissions d'un endroit à l'autre.</li> </ul>
<b>Faisabilité administrative</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utiliser les structures administratives et bureaucratiques actuelles quand c'est possible.</li> <li>• Prévoir des dispositions de surveillance et d'application dans l'élaboration des politiques.</li> <li>• Élaborer des politiques qui peuvent être adaptées avec le temps, à mesure que de nouveaux renseignements sur les coûts, les technologies et les préférences des consommateurs sont accessibles.</li> <li>• Minimiser le plus possible les exonérations et les exceptions.</li> </ul>
<b>Acceptabilité politique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inclure le public dans la prise de décision sur les politiques.</li> <li>• Renforcer progressivement les exigences de réduction des émissions pour éviter les variations rapides des prix à la consommation et des coûts pour l'industrie.</li> <li>• Tirer parti des possibilités d'avantages conjoints des politiques.</li> <li>• Se montrer réaliste au sujet de l'importance de l'acceptabilité politique comme critère lors de la comparaison des politiques.</li> </ul>

En résumé, les politiques contraignantes ont plus de probabilités de se révéler fructueuses si :

- elles sont directement liées à des limites d'émissions contraignantes et de plus en plus sévères ou à un prix du carbone contraignant et de plus en plus élevé;
- elles comportent des dispositions de surveillance et des pénalités appropriées;

- elles offrent une grande flexibilité en matière de conformité;
- elles traitent équitablement les nouvelles entreprises et les entreprises établies;
- elles compensent les groupes sur lesquels les politiques ont des effets négatifs (au moins durant la transition);
- elles incluent le public dans la prise de décision.

La réussite des politiques ou des ensembles de politiques est aussi améliorée par une large couverture entre les secteurs et les provinces et territoires, laquelle peut être réalisée grâce à l'harmonisation entre les régions du Canada et l'établissement de relations internationales. Il est possible de répondre aux inquiétudes concernant les incidences sur la compétitivité résultant de l'existence de politiques moins rigoureuses chez certains partenaires commerciaux du Canada par l'imposition de tarifs douaniers au besoin.

L'appui de tous les ordres de gouvernement à l'écosystème de l'innovation est un important instrument politique susceptible d'encourager l'emploi des technologies existantes et la conception et l'usage futur de nouvelles technologies. L'aide financière par le biais d'un fonds technologique ou de politiques fiscales, ou d'autres outils du continuum de l'innovation, de la R-D à la croissance des entreprises, en passant par les projets pilotes et la commercialisation, peut favoriser l'émergence de nouvelles technologies. Ce soutien pourrait atténuer les risques du marché national et des exportations, encourager le commerce, protéger les droits de propriété intellectuelle et favoriser les écosystèmes d'investissement. Une combinaison d'autres mesures, comme les investissements dans l'infrastructure publique, la mobilisation de la communauté et la réforme réglementaire, pourrait encore mieux soutenir la réduction des émissions et la transformation du système énergétique encouragées par des politiques contraignantes. Par exemple, les organismes de réglementation des sociétés d'énergie seraient bien placés pour appuyer la transformation, en raison de leur vision à long terme de la planification, de leur capacité à utiliser les prix pour tenir compte d'un éventail de coûts et répondre aux craintes concernant la distribution et à l'indépendance des processus réglementaires quasi-judiciaires.

La transition vers un système énergétique à faibles émissions nécessite un processus politique itératif, et la séquence des réductions des émissions dépendra, en partie, des politiques adoptées. Les entreprises et les consommateurs commenceront immédiatement à apporter des changements en réponse aux politiques, mais les effets de ces dernières se produiront à court, moyen et long terme, au rythme du remplacement des immobilisations. De plus, de nouvelles technologies et des améliorations technologiques pourront voir le jour. À mesure que les décideurs évalueront le système dans son ensemble et rassembleront de l'information sur l'étendue de la réduction des émissions, sur

les progrès technologiques, sur les politiques établies dans d'autres États et sur les répercussions économiques, ils pourront introduire de nouvelles politiques ou adapter la rigueur des politiques en place aux besoins (en équilibrant besoin d'adaptabilité et avantages de la continuité politique). Si la transition ne s'effectuera pas sans coûts, il est possible, grâce à des politiques offrant la rigueur et la flexibilité appropriées, de réduire de manière considérable les émissions du système énergétique canadien sur plusieurs décennies de façon à ne pas mettre en péril la croissance économique à long terme et la compétitivité du Canada.

#### 5.4 EN CONCLUSION

Durant ses travaux, le comité d'experts a constaté que de nombreux changements importants dans les hypothèses et dans les connaissances sur les solutions politiques et technologiques aux changements climatiques s'étaient produits ces dernières décennies. Au début des années 1990, certains des procédés nécessaires à la transition vers une économie à faibles émissions n'étaient pas offerts dans le commerce et il était difficile d'imaginer une voie concrète vers la réalisation de réductions des émissions à l'échelle nécessaire. On se concentrait alors sur les gains d'efficacité énergétique plutôt que sur la substitution interénergétique et les débats insistaient sur une exploitation séquentielle des possibilités de réduire les émissions. Les avis divergeaient sur le temps que prendrait la transition vers des technologies énergétiques à faibles émissions et le message politique était souvent que la majorité des émissions de gaz à effet de serre pouvaient être réduites grâce à des gestes volontaires des entreprises et des individus, à la condition qu'ils disposent des renseignements adéquats. Les débats étaient fréquemment centrés sur la détermination des technologies et des politiques *appropriées* pour contrer les changements climatiques.

Aujourd'hui, notre compréhension de ces questions et des questions connexes a évolué. Les technologies nécessaires pour passer à une économie à faibles émissions sont à présent commercialement disponibles et leur prix baisse. Il est possible d'envisager plusieurs cheminements pour atteindre une réduction des émissions de 60 à 90 % d'ici au milieu du siècle. Nous savons également que les émissions de dioxyde de carbone ont continué à croître en valeur absolue depuis 1990, malgré une considérable amélioration de l'efficacité énergétique, d'où la nécessité d'une transition rapide vers des sources énergétiques à émissions nulles. Et devant les défis et les délais que le processus comporte, au lieu de lancer des initiatives de réduction séquentielles, il faut prendre un ensemble de mesures simultanées. Un corpus croissant de données probantes sur la dynamique des transitions de système énergétique démontre que ces transformations s'effectuent en général lentement, sur plusieurs décennies, mais qu'elles peuvent être accélérées grâce à un appui gouvernemental judicieux.

Enfin, nous savons aujourd'hui que les politiques contraignantes sont nécessaires au changement et que les politiques recourant à des signaux de prix pour modifier les décisions peuvent être particulièrement efficaces pour réduire les émissions à un coût gérable. Si le débat sur les technologies et les politiques les plus efficaces pour contrer les changements climatiques se poursuit, il est de plus en plus admis qu'il n'existe pas de façon unique de faire les choses et que la clé réside dans la flexibilité.

Le système énergétique et le climat de la Terre sont des systèmes dynamiques et complexes liés par les émissions de dioxyde de carbone provenant de l'emploi des combustibles fossiles. Les changements climatiques sont un formidable défi institutionnel, car ils combinent la nécessité d'une action étendue pour protéger une ressource commune — l'atmosphère terrestre — et le besoin pour la société d'accepter volontairement de payer des coûts aujourd'hui pour des bénéfices dont profiteront en grande partie les générations futures. Cependant, la complexité des changements climatiques sur les plans technologique et politique est peut-être surestimée. Le problème des changements climatiques et ses solutions potentielles ont été étudiés en profondeur et sont à présent bien connus, et les politiques et les procédés requis pour atténuer les émissions de dioxyde de carbone produites par la consommation d'énergie sont de plus en plus déployés partout dans le monde. La transition vers un système énergétique à faibles émissions ne se fera pas sans coûts, mais grâce à la combinaison appropriée de politiques strictes et flexibles, dans l'idéal en parallèle avec l'innovation technologique, le Canada peut réussir une telle transition au cours des prochaines décennies.

## Références

## Références

- AAC, 2012 – ASSOCIATION DE L'ALUMINIUM DU CANADA. *Aluminium and Energy*. Adresse : <http://www.thealuminiumdialog.com/en/sustainable-development/aluminium-and-energy> (consulté en mai 2015).
- ACE, 2014 – ASSOCIATION CANADIENNE DE L'ÉLECTRICITÉ. *Vision 2050 : L'avenir du réseau électrique du Canada*, Ottawa, ON, ACE.
- ACE, 2015 – ASSOCIATION CANADIENNE DE L'ÉLECTRICITÉ. *Le réseau intelligent*. Adresse : <http://www.electricity.ca/resources/smart-grid.php> (consulté en juin 2015).
- ACG, 2012a – ACADÉMIE CANADIENNE DU GÉNIE. *Canada: Winning as a Sustainable Energy Superpower - Volume I*, Ottawa, ON, Energy Pathways Task Force.
- ACG, 2012b – ACADÉMIE CANADIENNE DU GÉNIE. *Canada: Winning as a Sustainable Energy Superpower - Volume II*, Ottawa, ON, Energy Pathways Task Force.
- ACG, 2014 – ACADÉMIE CANADIENNE DU GÉNIE. *Canada: Becoming a Sustainable Energy Powerhouse*, Ottawa, ON, ACG.
- Acker, 2011 – ACKER, T. *IEA Wind Task 24 Integration of Wind and Hydropower Systems - Volume 2: Participant Case Studies*, Golden, CO, National Renewable Energy Laboratory.
- Adams, 1997 – ADAMS, J. *Environmental Policy and Competitiveness in a Globalized Economy: Conceptual Issues and a Review of Empirical Evidence*, communication présentée dans le cadre du Workshop on Economic Globalization and Environment, 30-31 janvier, Vienne, Autriche.
- Adams et Thornhill, 2015 – ADAMS, C. et J. THORNHILL. « Gates to Double Investment in Renewable Energy Projects ». *Financial Times* (25 juin).
- Adger *et al.*, 2014 – ADGER, W. N., J. M. PULHIN, J. BARNETT, G. D. DABELKO, G. K. HOVELSRUD, M. LEVY, ... C. H. VOGEL. « Sécurité des personnes », dans, Field, C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, . . . L. L. White (réd.), *Changements climatiques 2014 : Incidences, adaptation et vulnérabilité. Partie A : Aspects mondiaux et sectoriels. Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du GIEC*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press.
- AEP, 2015 – ALBERTA ENVIRONMENT AND PARKS. *Greenhouse Gas Reduction Program*. Adresse : <http://esrd.alberta.ca/focus/alberta-and-climate-change/regulating-greenhouse-gas-emissions/greenhouse-gas-reduction-program/default.aspx> (consulté en juillet 2015).
- AIE, 2003a – AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE. *World Energy Investment Outlook 2003*, Paris, France, AIE.
- AIE, 2003b – AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE. *The Power to Choose: Demand Response in Liberalised Electricity Market*, Paris, France, AIE.
- AIE, 2007 – AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE. *Tracking Industrial Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emissions*, Paris, France, AIE.
- AIE, 2009a – AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE. *Energy Technology Transitions for Industry*, Paris, France, AIE.
- AIE, 2009b – AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE. *Energy Policies of IEA Countries: Canada 2009 Review*, Paris, France, AIE.
- AIE, 2009c – AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE. *Transport, Energy and CO<sub>2</sub>: Moving Toward Sustainability*, Paris, France, AIE.
- AIE, 2011 – AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE. *Technology Roadmap: Biofuels for Transport*, Paris, France, AIE.
- AIE, 2012a – AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE. *Technology Roadmap: Fuel Economy of Road Vehicles*, Paris, France, AIE.
- AIE, 2012b – AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE. *CCS Retrofit: Analysis of the Globally Installed Coal-Fired Power Plant Fleet*, Paris, France, AIE.

- AIE, 2013 – AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE. *Key World Energy Statistics*, Paris, France, AIE.
- AIE, 2014a – AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE. *Electricity Information*, Paris, France, AIE.
- AIE, 2014b – AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE. *Statistics*. Adresse : <http://www.iea.org/statistics/> (consulté en novembre 2014).
- AIE, 2014c – AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE. *Renewable Energy Medium-Term Market Report 2014*, Paris, France, AIE.
- AIE, 2014d – AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE. *World Energy Outlook 2014: Executive Summary*, Paris, France, AIE.
- AIE, 2015a – AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE. *Medium-Term Oil Market Report 2015*, Paris, France, AIE.
- AIE, 2015b – AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE. *Energy and Climate Change*, Paris, France, AIE.
- Alcott, 2005 – ALLCOTT, B. « Jevons' paradox », *Ecological Economics*, vol. 52, p. 9-21.
- Allcott et Wozny, 2013 – ALLCOTT, H. et N. WOZNY. « Gasoline prices, fuel economy, and the energy paradox », *Review of Economics and Statistics*, vol. 96, n°5, p. 779-795.
- Al-Mansour et Zuwala, 2010 – AL-MANSOUR, F. et J. ZUWALA. « An evaluation of biomass co-firing in Europe », *Biomass and Bioenergy*, vol. 34, n°5, p. 620-629.
- Ambassade des États-Unis, 2015 – AMBASSADE DES ÉTATS-UNIS. *U.S.-Canada Relations: Energy*. Adresse : <http://canada.usembassy.gov/canada-us-relations/energy.html> (consulté en juillet 2015).
- Amdur *et al.*, 2014 – AMDUR, D., B. RABE et C. BORICK. « Public views on a carbon tax depend on the proposed use of revenue », *Issues in Energy and Environmental Policy*, vol. 13, p. 1-9.
- Analytica Advisors, 2013 – ANALYTICA ADVISORS. *Canadian Clean Technology Industry Report 2013*, Ottawa, ON, Analytica Advisors.
- Analytica Advisors, 2015 – ANALYTICA ADVISORS. *2015 Canadian Clean Technology Industry Report: Synopsis*, Ottawa, ON, Analytica Advisors.
- ANC, 2010 – ASSOCIATION NUCLÉAIRE CANADIENNE. *National Nuclear Attitude Survey*, Ottawa, ON, ANC.
- ANC, 2011 – ASSOCIATION NUCLÉAIRE CANADIENNE. *National Nuclear Attitude Survey*, Ottawa, ON, ANC.
- ANC, 2012 – ASSOCIATION NUCLÉAIRE CANADIENNE. *National Nuclear Attitude Survey*, Ottawa, ON, ANC.
- Anderson *et al.*, 2011 – ANDERSON, S. T., R. KELLOGG et J. M. SALLEE. « What do consumers believe about future gasoline prices? », *National Bureau of Economic Research Working Paper Series*, No. 16974.
- ARC, 2008 – AGENCE DU REVENU DU CANADA. *Actions accréditives*. Adresse : <http://www.cra-arc.gc.ca/tx/bsnss/tpcs/fts-paa/menu-fra.html> (consulté en avril 2015).
- Arent *et al.*, 2014 – ARENT, D. J., R. S. J. TOL, E. FAUST, J. P. HELLA, S. KUMAR, K. M. STRZEPEK, ... D. YAN. « Secteurs et services économiques clés », dans Field, C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, ... L. L. White (réd.), *Changements climatiques 2014 : Incidences, adaptation et vulnérabilité. Partie A : Aspects mondiaux et sectoriels. Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du GIEC*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press.
- Banerjee *et al.*, 2012 – BANERJEE, R., Y. CONG, D. GIELEN, G. JANNUZZI, F. MARÉCHAL, A. T. MCKANE, ... E. WORRELL. « Chapter 8 - Energy End Use: Industry », dans *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*, New York, NY, Cambridge University Press et International Institute for Applied Systems Analysis.
- Banque mondiale, 2015 – BANQUE MONDIALE. *World Development Indicators*, Washington, DC, Banque mondiale.

- Bataille *et al.*, 2009 – BATAILLE, C., B. DACHIS et N. RIVERS. *Pricing Greenhouse Gas Emissions: The Impact on Canada's Competitiveness*, Toronto, ON, Institut C.D. Howe.
- Bataille *et al.*, 2014 – BATAILLE, C., J. CHAN, D. SAWYER et R. ADAMSON. « Canada », dans, Sachs, J., L. Tubiana, E. Guerin, H. Waisman, C. Mas, M. Colombier et G. Schmidt-Traub (réd.), *Pathways to Deep Decarbonization: Final 2014 Report*, Paris, France, Sustainable Development Solutions Network (SDSN) and Institute for Sustainable Development and International Relations (IDDRI).
- Beatley, 2000 – BEATLEY, T. *Green Urbanism: Learning from European Cities*. Washington, DC, Island Press.
- Benson *et al.*, 2012 – BENSON, S. M., K. BENNACEUR, P. COOK, J. DAVISON, H. DE CONINCK, K. FARHAT, ... I. WRIGHT. « Chapter 13 - Carbon Capture and Storage », dans, *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*, New York, NY, Cambridge University Press et International Institute for Applied Systems Analysis.
- Berry et Jaccard, 2001 – BERRY, T. et M. JACCARD. « The renewable portfolio standard: Design considerations and an implementation survey », *Energy Policy*, vol. 29, n°4, p. 263-277.
- Boden *et al.*, 2013 – BODEN, T. A., G. MARLAND et R. J. ANDRES. *Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO<sub>2</sub> Emissions*, Oak Ridge, TN, Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy.
- Bongardt *et al.*, 2010 – BONGARDT, D., M. BREITHAUF et F. CREUTZIG. *Beyond the Fossil City: Towards Low Carbon Transport and Green Growth*, Bangkok, Thaïlande, GTZ working paper.
- BP, 2015 – BP. *BP Energy Outlook 2035*, Londres, Royaume-Uni, BP.
- Brown *et al.*, 2012 – BROWN, T., A. GAMBHIR, N. FLORING et P. FENNELL. *Reducing CO<sub>2</sub> Emissions from Heavy Industry: A Review of Technologies and Considerations for Policy Makers*, Londres, Royaume-Uni, Grantham Institute, Imperial College London.
- Bruckner *et al.*, 2014 – BRUCKNER, T., I. A. BASHMAKOV, Y. MULUGETTA, H. CHUM, A. DE LA VEGA NAVARRO, J. EDMONDS, ... X. ZHANG. « Systèmes énergétiques », dans, Edenhofer, O., R., Y. Pichs-Madruga, E. F. Sokona, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, ... J. C. Minx (réd.), *Changements climatiques 2014 : L'atténuation du changement climatique. Contribution du Groupe de travail III au cinquième Rapport d'évaluation du GIEC*, New York, NY, Cambridge University Press.
- BVGO, 2011 – BUREAU DU VÉRIFICATEUR GÉNÉRAL DE L'ONTARIO. *Rapport annuel 2011 - Bureau du vérificateur général de l'Ontario : Secteur de l'électricité - Initiatives en matière d'énergie renouvelable*, Toronto, ON, BVGO.
- CAC, 2009 – CONSEIL DES ACADÉMIES CANADIENNES. *Innovation et stratégies d'entreprise : pourquoi le Canada n'est pas à la hauteur*, Ottawa, ON, Comité d'experts sur l'innovation dans les entreprises, CAC.
- CAC, 2013 – CONSEIL DES ACADÉMIES CANADIENNES. *L'état de la R-D industrielle au Canada*, Ottawa, ON, Comité d'experts sur l'état de la R-D industrielle au Canada, CAC.
- CAC, 2014 – CONSEIL DES ACADÉMIES CANADIENNES. *Incidences environnementales de l'extraction du gaz de schiste au Canada*, Ottawa, ON, Comité d'experts chargé de l'évaluation Harnacher la science et la technologie pour comprendre les incidences environnementales liées à l'extraction du gaz de schiste, CAC.
- CAC, 2015a – CONSEIL DES ACADÉMIES CANADIENNES. *Compréhension des données : Bruit des éoliennes*, Ottawa, ON, Comité d'experts sur les éoliennes, le bruit et la santé humaine, CAC.
- CAC, 2015b – CONSEIL DES ACADÉMIES CANADIENNES. *Solutions technologiques pour réduire l'empreinte écologique de l'exploitation des sables bitumineux au Canada*, Ottawa, ON, Comité d'experts sur la capacité des technologies nouvelles et émergentes de réduire les incidences environnementales de l'exploitation des sables bitumineux, CAC.

- Campbell, 2013 – CAMPBELL, R. *Increasing the Efficiency of Existing Coal-Fired Power Plants*, Washington, DC, Congressional Research Service.
- CAPP, 2014 – CANADIAN ASSOCIATION OF PETROLEUM PRODUCERS. *Crude Oil: Forecast, Markets & Transportation*, Ottawa, ON, CAPP.
- CARB, 2014 – CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD. *Assembly Bill 32 Overview*. Adresse : <http://www.arb.ca.gov/cc/ab32/ab32.htm> (consulté en juillet 2015).
- Carter, 2001 – CARTER, S. « Breaking the consumption habit: Ratemaking for efficient resource decisions », *The Electricity Journal*, vol. 14, n°10, p. 66-74.
- CCC, s.d. – COMMITTEE ON CLIMATE CHANGE. *The Climate Change Act and UK Regulations*. Adresse : <http://www.theccc.org.uk/tackling-climate-change/the-legal-landscape/global-action-on-climate-change/> (consulté en juillet 2015).
- CCEMC, 2013 – CLIMATE CHANGE AND ÉMISSIONS MANAGEMENT CORPORATION. *2012/2013 Annual Report: Global Challenges. Local Solutions*, Sherwood Park, AB, CCEMC.
- CEDD-BVG, 2012 – COMMISSAIRE À L'ENVIRONNEMENT ET AU DÉVELOPPEMENT DURABLE - BUREAU DU VÉRIFICATEUR GÉNÉRAL DU CANADA. *Rapport du commissaire à l'environnement et au développement durable : Chapitre 4 — Une étude du soutien fédéral au secteur des combustibles fossiles*, Ottawa, ON, BVG.
- CEDD-BVG, 2014 – COMMISSAIRE À L'ENVIRONNEMENT ET AU DÉVELOPPEMENT DURABLE - BUREAU DU VÉRIFICATEUR GÉNÉRAL DU CANADA. *Rapport de la commissaire à l'environnement et au développement durable : Chapitre 1 — L'atténuation des changements climatiques*, Ottawa, ON, BVG.
- Chum *et al.*, 2011 – CHUM, H., A. FAAIJ, J. MOREIRA, G. BERNDEN, P. DHAMJIA, H. DONG, ... K. PINGOUD. « Bioénergie », dans, Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, ... C. von Stechow (éd.), *Rapport spécial sur les sources d'énergie renouvelable et l'atténuation du changement climatique*, New York, NY, Cambridge University Press.
- Church *et al.*, 2013 – CHURCH, J. A., P. U. CLARK, A. CAZENAVE, J. M. GREGORY, S. JEVREJEVA, A. LEVERMANN, ... A. S. UNNIKRISSHANN. « Élévation du niveau de la mer », dans, Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, ... P. M. Midgley (éd.), *Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du GIEC*, New York, NY, Cambridge University Press.
- CIEEDAC, 2014 – CANADIAN INDUSTRIAL ENERGY END-USE DATA AND ANALYSIS CENTRE. *Cogeneration Facilities in Canada 2014*, Burnaby, BC, Simon Fraser University.
- Cockfield, 2011 – COCKFIELD, A. J. « Optimal Climate Change Tax Policy for Small Open Economies », dans, Cullen, R. et J. D. Vanderwolk (éd.), *Green Taxation in East Asia*, Northampton, MA, Edward Elgar.
- Commission de l'écofiscalité du Canada, 2015 – COMMISSION DE L'ÉCOFISCALITÉ DU CANADA. *La voie à suivre : pour une approche concrète de réduction des émissions de gaz à effet de serre au Canada*, Ottawa, ON, Commission de l'écofiscalité du Canada.
- Cook *et al.*, 2012 – COOK, B., J. GAZZANO, Z. GUNAY, L. HILLER, S. MAHAJAN, A. TASKAN et S. VILOGORAC. « The smart meter and a smarter consumer: Quantifying the benefits of smart meter implementation in the United States », *Chemistry Central Journal*, vol. 6, p. 1-16.
- COSIA, s.d.a – CANADA'S OIL SANDS INNOVATION ALLIANCE. *About COSIA*. Adresse : <http://www.cosia.ca/about-cosia> (consulté en juillet 2015).
- COSIA, s.d.b – CANADA'S OIL SANDS INNOVATION ALLIANCE. *Vacuum Insulated Tubing*. Adresse : <http://www.cosia.ca/vacuum-insulated-tubing> (consulté en mars 2015).
- Creutzig *et al.*, 2011 – CREUTZIG, F., E. MCGLYNN, J. C. MINX et O. EDENHOFER. « Climate policies for road transport revisited (I): Evaluation of the current framework », *Energy Policy*, vol. 39, p. 2396-2406.

- Creutzig *et al.*, 2010 – CREUTZIG, F., C. FLACHSLAND, S. BRUNNER, J. MINX, E. MCGLYNN, et O. EDENHOFER. *CITIES: Car Industry, Road Transport and an International Emission Trading Scheme—Policy Options*, Berlin, Allemagne, BMW Group and Potsdam Institute for Climate Impact Research.
- CSC, 2014 – COUR SUPRÊME DU CANADA. *Nation Tsilhqot'in c. Colombie-Britannique*, Ottawa, ON, CSC.
- Davis *et al.*, 2010 – DAVIS, S. J., K. CALDEIRA et H. D. MATTHEWS. « Future CO<sub>2</sub> emissions and climate change from existing energy infrastructure », *Science*, vol. 329, n°5997, p. 1330-1333.
- Depuru *et al.*, 2011 – DEPURU, S. S. R., L. WANG et V. DEVABHAKTUNI. « Smart meters for power grid: Challenges, issues, advantages and status », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n°6, p. 2736-2742.
- Deweese, 2012 – DEWEESE, D. *What Is Happening to Ontario Electricity Prices*, Ottawa, ON, Sustainable Prosperity.
- DOE, 2012 – U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Life-Cycle Analysis of Vehicle and Fuel Systems with the GREET Model*, Washington, DC, DOE.
- DOE, 2013a – DEPARTMENT OF ENERGY. *Passive Solar Home Design*. Adresse : <http://energy.gov/energysaver/articles/passive-solar-home-design> (consulté en février 2015).
- DOE, 2013b – U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Grid Energy Storage*, Washington, DC, DOE.
- DOE, 2015a – U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Alternative Fuels Data Center: Fuel Prices*. Adresse : <http://www.afdc.energy.gov/fuels/prices.html> (consulté en mars 2015).
- DOE, 2015b – U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Alternative Fuels Data Center*. Adresse : <http://www.afdc.energy.gov/> (consulté en mars 2015).
- DSS et RWDI, 2005 – DSS MANAGEMENT CONSULTANTS INC. et RWDI AIR INC. *Cost Benefit Analysis: Replacing Ontario's Coal-Fired Electricity Generation*, Toronto, ON, ministère de l'énergie de l'Ontario.
- Ehrenfeld et Gertler, 1997 – EHRENFELD, J. et N. GERTLER. « Industrial ecology in practice: The evolution of interdependence at Kalundborg », *Journal of Industrial Ecology*, vol. 1, n°1, p. 67-79.
- EIA, 2013 – ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. *International Energy Outlook - Appendix A: Reference Case Projections*, Washington, DC, EIA.
- EIA, 2014a – ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. *Canada Country Profile*, Washington, DC, EIA.
- EIA, 2014b – ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. *Annual Energy Outlook with Projections to 2040*, Washington, DC,
- EIA, 2015 – ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. *U.S. Field Production of Crude Oil*. Adresse : <http://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=MCRFPUS2&f=A> (consulté en juillet 2015).
- Elgie et McClay, 2013 – ELGIE, S. et J. MCCLAY. « Policy Commentary/Commentaire BC's carbon tax shift is working well after four years (attention Ottawa) », *Canadian Public Policy*, vol. 39, n°2, p. 1-10.
- Elvidge *et al.*, 2009 – ELVIDGE, C. D., D. ZISKIN, K. E. BAUGH, B. T. TUTTLE, T. GHOSH, D. W. PACK, ... M. ZHIZHIN. « A fifteen year record of global natural gas flaring derived from satellite data », *Energies*, vol. 2, p. 595-622.
- Energy Education: University of Calgary, 2015 – ENERGY EDUCATION: UNIVERSITY OF CALGARY. *Canadian support for nuclear power*. Adresse : [http://energyeducation.ca/encyclopedia/Canadian\\_support\\_for\\_nuclear\\_power#cite\\_note-pfukuCNA-3](http://energyeducation.ca/encyclopedia/Canadian_support_for_nuclear_power#cite_note-pfukuCNA-3) (consulté en juin 2015).

- Environnement Canada, 2013a – ENVIRONNEMENT CANADA. *Fiche d'information : Règlement sur la réduction des émissions de dioxyde de carbone - secteur de l'électricité thermique au charbon*. Adresse : <http://www.ec.gc.ca/default.asp?lang=Fr&n=5C4438BC-1&news=D375183E-0016-4145-A20B-272BDB94580A> (consulté en janvier 2015).
- Environnement Canada, 2013b – ENVIRONNEMENT CANADA. *Rapport d'inventaire national 1990–2011 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada - Partie 1*, Ottawa, ON, Environnement Canada.
- Environnement Canada, 2013c – ENVIRONNEMENT CANADA. *Tendances en matière d'émissions au Canada*, Ottawa, ON, Environnement Canada.
- Environnement Canada, 2014 – ENVIRONNEMENT CANADA. *Rapport d'inventaire national 1990–2012 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada - Partie 3*, Ottawa, ON, Environnement Canada.
- Environnement Canada, 2015a – ENVIRONNEMENT CANADA. *Émissions de gaz à effet de serre*. Adresse : <https://www.ec.gc.ca/indicateurs-indicators/default.asp?lang=Fr&n=FBF8455E-1> (consulté en avril 2015).
- Environnement Canada, 2015b – ENVIRONNEMENT CANADA. *Émissions de gaz à effet de serre par province et territoire*. Adresse : <https://www.ec.gc.ca/indicateurs-indicators/default.asp?lang=Fr&n=18F3BB9C-1> (consulté en avril 2015).
- Environnement Canada, 2015c – ENVIRONNEMENT CANADA. *Rapport d'inventaire national 1990–2013 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada - Partie 1*, Ottawa, ON, Environnement Canada.
- Enwave, 2013 – ENWAVE. *District Cooling System*. Adresse : [http://www.enwave.com/district\\_cooling\\_system.html](http://www.enwave.com/district_cooling_system.html) (consulté en mai 2015).
- Fagnant et Kockelman, 2015 – FAGNANT, D. J. et K. KOCKELMAN. « Preparing a nation for autonomous vehicles: Opportunities, barriers and policy recommendations », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 77, n°0, p. 167-181.
- Finkbeiner, 2014 – FINKBEINER, M. « Indirect land use change – Help beyond the hype? », *Biomass and Bioenergy*, vol. 62, n°0, p. 218-221.
- Fischedick *et al.*, 2014 – FISCHEDICK, M., J. ROY, A. ABDEL-AZIZ, A. ACQUAYE, J. M. ALLWOOD, J.-P. CERON, ...K. TANAKA. « Industry », dans Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, . . . J. C. Minx (réd.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, New York, NY, Cambridge University Press.
- Fouquet, 2010 – FOUQUET, R. « The slow search for solutions: Lessons from historical energy transitions by sector and service », *Energy Policy*, vol. 38, n°11, p. 6586-6596.
- Fouquet et Pearson, 2012 – FOUQUET, R. et P. J. G. PEARSON. « Past and prospective energy transitions: Insights from history », *Energy Policy*, vol. 50, p. 1-7.
- Friedlingstein *et al.*, 2014 – FRIEDLINGSTEIN, P., R. M. ANDREW, J. ROGELJ, G. P. PETERS, J. G. CANADELL, R. KNUTTI, ...C. L. QUÉRÉ. « Persistent growth of CO<sub>2</sub> emissions and implications for reaching climate targets », *Nature Geoscience*, vol. 7, p. 709-714.
- Fulton et Miller, 2015 – FULTON, L. et M. MILLER. *Strategies For Transitioning to Low-Carbon Emission Trucks in the United States*, Davis, CA, National Centre for Sustainable Transportation, UC Davis Institute of Transportation Studies.
- Furtado *et al.*, 2011 – FURTADO, A. T., M. I. G. SCANDIFFIO et L. A. B. CORTEZ. « The Brazilian sugarcane innovation system », *Energy Policy*, vol. 39, n°1, p. 156-166.
- G7, 2015 – G7. *Déclaration des dirigeants Sommet du G-7 Allemagne*. Adresse : [http://www.international.gc.ca/g7/g7\\_germany\\_declaration-g7\\_allemande\\_declaration.aspx?lang=fra](http://www.international.gc.ca/g7/g7_germany_declaration-g7_allemande_declaration.aspx?lang=fra) (consulté en juin 2015).
- Galiana et Green, 2010 – GALIANA, I. et C. GREEN. « An Analysis of a Technology-led Policy as a Response to Climate Change », dans, Lomborg, B. (réd.), *Smart Solutions to Climate Change: Comparing Costs and Benefits*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press.

- Gallagher *et al.*, 2012 – GALLAGHER, K. S., A. GRUBLER, L. KUHL, G. NEMET et C. WILSON. « The energy technology innovation system », *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 37, p. 137-162.
- GC, 2012 – GOUVERNEMENT DU CANADA. *Règlement sur la réduction des émissions de dioxyde de carbone - secteur de l'électricité thermique au charbon : Résumé de l'étude d'impact de la réglementation pour le règlement actuel*, Ottawa, ON, Gouvernement du Canada.
- GC, 2014a – GOUVERNEMENT DU CANADA. *Règlement sur les émissions de gaz à effet de serre des automobiles à passagers et des camions légers : Résumé de l'étude d'impact de la réglementation*, Ottawa, ON, Gouvernement du Canada.
- GC, 2014b – GOUVERNEMENT DU CANADA. *Le gouvernement du Canada prend d'autres mesures en vue de réduire les émissions de gaz à effet de serre et les polluants atmosphériques des automobiles et des camions*. Adresse : [http://nouvelles.gc.ca/web/article-fr.do?mthd=advSrCh&crtr.mnthndVI=11&crtr.mnthStrtVI=1&crtr.page=1&nid=886509&crtr.yrndVI=2014&crtr.kw=vehicules&crtr.yrStrtVI=2002&crtr.dyStrtVI=1&crtr.dyndVI=19&\\_ga=1.123318476.691756435.1479746663](http://nouvelles.gc.ca/web/article-fr.do?mthd=advSrCh&crtr.mnthndVI=11&crtr.mnthStrtVI=1&crtr.page=1&nid=886509&crtr.yrndVI=2014&crtr.kw=vehicules&crtr.yrStrtVI=2002&crtr.dyStrtVI=1&crtr.dyndVI=19&_ga=1.123318476.691756435.1479746663) (consulté en avril 2015).
- GEA, 2012 – GLOBAL ENERGY ASSESSMENT. *Global Energy Assessment - Towards a Sustainable Future*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press et International Institute for Applied Systems Analysis.
- Gehl, 2011 – GEHL, J. *Cities for People*. Washington, DC, Island Press.
- GIEC, 2005 – GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT. *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press.
- GIEC, 2013a – GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT. *Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du GIEC*, New York, NY, Cambridge University Press.
- GIEC, 2013b – GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT. « Summary for Policymakers », dans, Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, . . . P. M. Midgley (réd.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, New York, NY, Cambridge University Press.
- GIEC, 2014a – GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT. « Chapter 26: North America », dans, Field, C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, . . . L. L. White (réd.), *Climate Change 2014: Impacts, Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, New York, NY, Cambridge University Press.
- GIEC, 2014b – GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT. *Changements climatiques 2014 : L'atténuation du changement climatique. Contribution du Groupe de travail III au cinquième Rapport d'évaluation du GIEC*, New York, NY, Cambridge University Press.
- GIEC, 2014c – GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT. *Changements climatiques 2014 : Incidences, adaptation et vulnérabilité. Partie A : Aspects mondiaux et sectoriels. Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du GIEC*, New York, NY, Cambridge University Press.
- GIEC, 2014d – GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT. « Summary for Policymakers », dans, Field, C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, . . . L. L. White (réd.), *Climate Change 2014: Impacts, Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, New York, NY, Cambridge University Press.

- GIEC, 2014e – GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT. « Summary for Policymakers », dans, Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, . . . J. C. Minx (réd.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, New York, NY, Cambridge University Press.
- Gillingham et Palmer, 2014 – GILLINGHAM, K. et K. PALMER. « Bridging the energy efficiency gap: Policy insights from economic theory and empirical evidence », *Review of Environmental Economics and Policy*, vol. 8, n°1, p. 18-38.
- GMP, 2015 – GREEN MOUNTAIN POWER. *eHome*. Adresse : <http://www.greenmountainpower.com/products-services/overview/e-home/> (consulté en juillet 2015).
- Goodman, 2010 – GOODMAN, R. *Power Connections: Canadian Electricity Trade and Foreign Policy*, Toronto, ON, Conseil international du Canada.
- Gordon *et al.*, 2015 – GORDON, D., A. BRANDT, J. BERGERSON et J. KOOMEY. *Know Your Oil: Creating a Global Oil-Climate Index*, Washington, DC, Carnegie Endowment for International Peace.
- Goulder et Parry, 2008 – GOULDER, L. H. et I. W. H. PARRY. « Instrument choice in environmental policy », *Review of Environmental Economics and Policy*, vol. 2, n°2, p. 152-174.
- Gouv. de la C.-B., 2010 – GOUVERNEMENT DE LA COLOMBIE-BRITANNIQUE. *Bill 17 - 2010 Clean Energy Act*, Victoria, BC, Gouvernement de la Colombie-Britannique.
- Gouv. de la C.-B., s.d.a – GOUVERNEMENT DE LA COLOMBIE-BRITANNIQUE. *Climate Action Plan*, Victoria, BC, Gouvernement de la Colombie-Britannique.
- Gouv. de la C.-B., s.d.b – GOUVERNEMENT DE LA COLOMBIE-BRITANNIQUE. *The BC Energy Plan: A Vision for Clean Energy Leadership*. Adresse : <http://www.energyplan.gov.bc.ca/bcep/default.aspx?hash=5> (consulté en juillet 2015).
- Gouv. de la C.-B., s.d.c – GOUVERNEMENT DE LA COLOMBIE-BRITANNIQUE. *How the Carbon Tax Works*. Adresse : <http://www.fin.gov.bc.ca/tbs/tp/climate/A4.htm> (consulté en juillet 2015).
- Gouv. de l'Ont., 2014 – GOUVERNEMENT DE L'ONTARIO. *Tour d'horizon de la Stratégie du gouvernement de l'Ontario en matière de changement climatique 2014*, Toronto, ON, ministère de l'Environnement et de l'Action en matière de changement climatique.
- Gouv. du Qc, 2014 – GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre du Québec : Description technique*, Québec, QC, Gouvernement du Québec.
- Grubler, 2012 – GRUBLER, A. « Energy transitions research: Insights and cautionary tales », *Energy Policy*, vol. 50, p. 8-16.
- Grubler *et al.*, 2012a – GRUBLER, A., F. AGUAYO, K. GALLAGHER, M. HEKKERT, K. JIANG, L. MYTELKA, . . . C. WILSON. « Chapter 24 - Policies for the Energy Technology Innovation System (ETIS) », dans, *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*, New York, NY, Cambridge University Press and the International Institute for Applied Systems Analysis.
- Grubler *et al.*, 2012b – GRUBLER, A., X. BAI, T. BUETTNER, S. DHAKAL, D. J. FISK, T. ICHINOSE, . . . H. WEISZ. « Chapter 18 - Urban Energy Systems », dans, *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*, New York, NY, Cambridge University Press and the International Institute for Applied Systems Analysis.
- Grubler *et al.*, 2012c – GRUBLER, A., T. B. JOHANSSON, L. MUNDACA, N. NAKICENOVIC, S. PACHAURI, K. RIAHI, . . . L. STRUPEIT, 2012. « Chapter 1 - Energy Primer », dans, *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*, New York, NY, Cambridge University Press and the International Institute for Applied Systems Analysis.

- GTM Research et ESA, 2015 – GTM RESEARCH et ENERGY STORAGE ASSOCIATION. *U.S. Energy Storage Monitor*, Boston, MA, GTM Research et ESA.
- Gupta *et al.*, 2007 – GUPTA, S., D. A. TIRPAK, N. BURGER, J. GUPTA, N. HÖHNE, A. I. BONCHEVA, ... A. SARI. « Policies, Instruments and Co-operative Arrangements », dans Metz, B., O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave et L. A. Meyer (éd.), *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, New York, NY, Cambridge University Press.
- Hansen, 2009 – HANSEN, J. « Cap and Fade ». *The New York Times* (7 décembre).
- Hardin, 1968 – HARDIN, G. « The Tragedy of the Commons », *Science*, vol. 162, n°3859, p. 1243-1248.
- Harrison, 2012 – HARRISON, K. « A tale of two taxes: The fate of environmental tax reform in Canada », *Review of Policy Research*, vol. 29, n°3, p. 383-407.
- Harrison, 2013 – HARRISON, K. *The Political Economy of British Columbia's Carbon Tax*, Paris, France, OCDE.
- Hartmann *et al.*, 2013 – HARTMANN, D. L., A. M. G. K. TANK, M. RUSTICUCCI, L. V. ALEXANDER, S. BRÖNNIMANN, Y. CHARABI, ... P. M. ZHAI. « Observations: Atmosphere and Surface », dans Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, ... P. M. Midgley (éd.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, New York, NY, Cambridge University Press.
- Harvey, 2009 – HARVEY, L. D. D. « Reducing energy use in the buildings sector: Measures, costs, and examples », *Energy Efficiency*, vol. 2, p. 139-163.
- Harvey, 2013 – HARVEY, L. D. D. « The potential of wind energy to largely displace existing Canadian fossil fuel and nuclear electricity generation », *Energy*, vol. 50, n°0, p. 93-102.
- Head, 2008 – HEAD, B. W. « Wicked problems in public policy », *Public Policy*, vol. 3, n°2, p. 101-118.
- Herzog, 2010 – HERZOG, H. « Scaling up carbon dioxide capture and storage: From megatons to gigatons », *Energy Economics, Special Issue on the Economics of Technologies to Combat Global Warming*, vol. 33, n°4, p. 597-604.
- Hill *et al.*, 2009 – HILL, J., S. POLASKY, E. NELSON, D. TILMAN, H. HUO, L. LUDWIG, ... D. BONTA. « Climate change and health costs of air emissions from biofuels and gasoline », *Proceedings of the National Academy of Sciences*.
- Hipel *et al.*, 2007 – HIPEL, K. W., M. M. JAMSHIDI, J. M. TIEN et C. C. WHITE III. « The future of systems, man, and cybernetics: Application domains and research methods », *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 37, n°5, p. 726-743.
- Hoffert *et al.*, 2002 – HOFFERT, M. I., K. CALDEIRA, G. BENFORD, D. R. CRISWELL, C. GREEN, H. HERZOG, ... T. M. L. WIGLEY. « Advanced technology paths to global climate stability: Energy for a greenhouse planet », *Science*, vol. 298, n°5595, p. 981-987.
- Hogg, 2008 – HOGG, P. W. *A Question of Parliamentary Power: Criminal Law and the Control of Greenhouse Gas Emissions*, Toronto, ON, Institut C.D. Howe.
- Hood, 2013 – HOOD, C. *Managing interactions between carbon pricing and existing energy policies: Guidance for Policymakers*, Paris, France, OCDE/IEA.
- Hope, 2011 – HOPE, C. W. « The social cost of CO<sub>2</sub> from the PAGE09 model », *Economics: The Open-Access, Open Assessment E-Journal*, vol. 5, n°2011-39.
- Hsu et Elliot, 2008 – HSU, S. et R. ELLIOT. « Regulating greenhouse gases in Canada: Constitutional and policy dimensions », *McGill Law Journal*, vol. 54, p. 463-516.

- Hydro-Québec, 2014 – HYDRO-QUÉBEC. *Comparaison des prix de l'électricité dans les grandes villes nord-américaines*, Montréal, QC, Hydro-Québec.
- Hydro-Québec, s.d.a – HYDRO-QUÉBEC. *Hydro-Québec en bref*. Adresse : <http://www.hydroquebec.com/a-propos/qui-sommes-nous/hydro-quebec-bref.html> (consulté en juillet 2015).
- Hydro-Québec, s.d.b – HYDRO-QUÉBEC. *Des chiffres qui parlent*. Adresse : <http://www.hydroquebec.com/electrification-transport/chiffres.html> (consulté en avril 2015).
- IAC, 2007 – INTERACADEMY COUNCIL. *Lighting the Way: Toward a Sustainable Energy Future*, Amsterdam, Pays-Bas, IAC.
- IEC, 2007 – INTERNATIONAL ELECTROCHEMICAL COMMISSION. *Efficient Electrical Energy Transmission and Distribution*, Genève, Suisse, IEC.
- IESO, s.d.a – INDEPENDENT ELECTRICITY SYSTEM OPERATOR. *Sudbury District Energy Hospital Cogeneration (6.7 MW) - Sudbury*. Adresse : <http://www.powerauthority.on.ca/sc-cc/sudbury-district-energy-hospital-cogeneration-67-mw-sudbury> (consulté en avril 2015).
- IESO, s.d.b – INDEPENDENT ELECTRICITY SYSTEM OPERATOR. *London Cogeneration Facility (12 MW) - London*. Adresse : <http://www.powerauthority.on.ca/combined-heat-power/london-cogeneration-facility-12-mw-london> (consulté en avril 2015).
- IMF, 2014 – INTERNATIONAL MONETARY FUND. *Getting Energy Prices Right: Summary for Policymakers*, Washington, DC, IMF.
- J&C Nyboer and Associates Inc., 2008 – J&C NYBOER AND ASSOCIATES INC. *A Technology Roadmap to Low Greenhouse Gas Emissions in the Canadian Economy: A Sectoral and Regional Analysis*, Surrey, BC, préparé pour la Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie.
- Jaccard, 2006a – JACCARD, M. *Sustainable Fossil Fuels: The Unusual Suspect in the Quest for Clean and Enduring Energy*. Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press.
- Jaccard, 2006b – JACCARD, M. « Mobilizing Producers toward Environmental Sustainability: The Prospects for Market-Oriented Regulations », dans, Toner, G. (réd.), *Sustainable Production: Building Canadian Capacity*, Vancouver, BC, University of British Columbia Press.
- Jaccard et Rivers, 2007 – JACCARD, M. et N. RIVERS. « Heterogeneous capital stocks and the optimal timing for CO<sub>2</sub> abatement », *Resource and Energy Economics*, vol. 29, p. 1-16.
- Jaccard *et al.*, 2011 – JACCARD, M., N. MELTON et J. NYBOER. « Institutions and processes for scaling up renewables: Run-of-river hydropower in British Columbia », *Energy Policy*, vol. 39, p. 4042-4050.
- Jaccard & Assoc. *et al.*, 2010 – M. K. JACCARD AND ASSOCIATES, UNIVERSITY OF TORONTO - CITIES CENTRE, UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA - INSTITUTE FOR RESOURCES, ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY. *Final Technical Report: The Capacity for Integrated Community Energy Solutions Policies to Reduce Urban Greenhouse Gas Emissions*, Vancouver, BC, Quality Urban Energy Systems of Tomorrow (QUEST).
- Jaccard *et al.*, 2012 – JACCARD, M., L. AGBENMABIESE, C. AZAR, A. DE OLIVEIRA, C. FISCHER, B. FISHER, ... X. ZHANG. « Chapter 22 - Policies for Energy System Transformations: Objectives and Instruments », dans, *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*, New York, NY, Cambridge University Press and the International Institute for Applied Systems Analysis.
- Jaccard et Rivers, 2008 – JACCARD, M. et N. RIVERS. « Canadian Policies for Deep Greenhouse Gas Reductions », dans, Leonard, J., C. Ragan et F. St-Hilaire (réd.), *A Canadian Priorities Agenda: Policy Choices to Improve Economic and Social Well-Being*, Montréal, QC, McGill-Queen's University Press.

- Jaffe *et al.*, 1995 – JAFFE, A. B., S. R. PETERSON, P. R. PORTNEY et R. N. STAVINS. « Environmental regulation and the competitiveness of U.S. manufacturing: What does the evidence tell us? », *Journal of Economic Literature*, vol. 33, p. 132-163.
- Johnson et Coderre, 2011 – JOHNSON, M. R. et A. R. CODERRE. « An analysis of flaring and venting activity in the Alberta upstream oil and gas industry », *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 61, n°2, p. 190-200.
- Joskow, 2011 – JOSKOW, P. « Comparing the costs of intermittent and dispatchable electricity generating technologies », *American Economic Review*, vol. 191, n°3, p. 238-241.
- Joung et Kim, 2013 – JOUNG, M. et J. KIM. « Assessing demand response and smart metering impacts on long-term electricity market prices and system reliability », *Applied Energy*, vol. 101, p. 441-448.
- Justice, 2009 – JUSTICE, S. *Private Financing of Renewable Energy: A Guide for Policymakers*, Basel, Suisse, United Nations Environment Programme, Sustainable Energy Finance Initiative, Bloomberg New Energy Finance, et Chatham House.
- Kahn Ribeiro *et al.*, 2012 – KAHN RIBEIRO, S., M. J. FIGUEROA, F. CREUTZIG, C. DUBEUX, J. HUPE et S. KOBAYASHI. « Chapter 9 - Energy End-Use: Transport », dans, *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*, New York, NY, Cambridge University Press et International Institute for Applied Systems Analysis.
- Kaya, 1990 – KAYA, Y. *Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios*, communication présentée dans le cadre du IPCC Energy and Industry Subgroup, Paris, France.
- Kennedy *et al.*, 2009 – KENNEDY C., J. STEINBERGER, B. GASSON, Y. HANSEN, T. HILLMAN, M. HAVRÁNEK, ... G. V. MENDEZ. « Greenhouse gas emissions from global cities », *Environmental Science & Technology*, vol. 43, p. 1520-5851.
- Keohane *et al.*, 1998 – KEOHANE, N. O., R. L. REVESZ et R. N. STAVINS. « The choice of regulatory instruments in environmental policy », *Harvard Environmental Law Review*, vol. 22, p. 313-367.
- Kim *et al.*, 2013 – KIM, Y., M. KIM et W. KIM. « Effect of the Fukushima nuclear disaster on global public acceptance of nuclear energy », *Energy Policy*, vol. 61, n°0, p. 822-828.
- King *et al.*, 2015 – KING, D., J. BROWNE, R. LAYARD, G. O'DONNELL, M. REES, N. STERN et A. TURNER. *A Global Apollo Program to Combat Climate Change*, Londres, Royaume-Uni, London School of Economics.
- Krohn et Damborg, 1999 – KROHN, S. et S. DAMBORG. « On public attitudes towards wind power », *Renewable Energy*, vol. 16, p. 954-960.
- Kumar *et al.*, 2011 – KUMAR, A., T. SCHEI, A. AHENKORAH, R. C. RODRIGUEZ, J.-M. DEVERNAY, M. FREITAS, ... Z. LIU. « Hydropower », dans, Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, . . . C. von Stechow (réd.), *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, New York, NY, Cambridge University Press.
- Larson *et al.*, 2012 – LARSON, E. D., Z. LI et R. H. WILLIAMS. « Chapter 12 - Fossil Energy », dans, *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*, New York, NY, Cambridge University Press et International Institute for Applied Systems Analysis.
- Laurijsen *et al.*, 2010 – LAURIJSSEN, J., F. J. DE GRAM, E. WORRELL et A. FAAJ. « Optimizing the energy efficiency of conventional multi-cylinder dryers in the paper industry », *Energy Economics*, vol. 35, p. 3738-3750.
- Le Quéré *et al.*, 2014 – LE QUÉRÉ, C., G. P. PETERS, R. J. ANDRES, R. M. ANDREW, T. A. BODEN, P. CIAIS, ... S. ZAEHLE. « Global carbon budget 2013 », *Earth System Science Data*, vol. 6, p. 235-263.
- Leach, 2012 – LEACH, A. « Policy forum: Alberta's specified gas emitters regulation », *Canadian Tax Journal*, vol. 60, n°4, p. 881-898.

- Levinson, 1996 – LEVINSON, A. « Environmental Regulations and Industry Location: Industrial and Domestic Evidence », dans Bhagwati, J. et R. E. Hudec (éd.), *Fair Trade and Harmonization: Prerequisites for Free Trade?*, Cambridge, MA, MIT Press.
- Linn et Richardson, 2013 – LINN, J. et N. RICHARDSON. « Cutting carbon, take two: A brief guide to federal electricity-sector climate policy without cap-and-trade », *Applied Economic Perspectives and Policy*, vol. 35, n°3, p. 377-397.
- Linn *et al.*, 2013 – LINN, J., E. MASTRANGELO et D. BURTRAW. *Regulating Greenhouse Gases from Coal Power Plants under the Clean Air Act*, Washington, DC, Resources for the Future.
- Loftus *et al.*, 2015 – LOFTUS, P. J., A. M. COHEN, J. C. S. LONG et J. D. JENKINS. « A critical review of global decarbonization scenarios: What do they tell us about feasibility? », *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, vol. 6, n°1, p. 93-112.
- Lucas et Yearsley, 2011 – LUCAS, A. R. et J. YEARSLEY. « The constitutionality of Federal Climate Change Legislation », *University of Calgary School of Public Policy Research Papers*, vol. 4, n°15.
- Lucon *et al.*, 2014 – LUCON, O., D. ÜRGE-VORSATZ, A. ZAIN AHMED, H. AKBARI, P. BERTOLDI, L. F. CABEZA, ... M. V. VILARIÑO. « Buildings », dans Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, ... J. C. Minx (éd.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, New York, NY, Cambridge University Press.
- Luiken, 2014 – LUIKEN, M. « Introduction to smart grids - Part I », *IEEE Canada Review*, vol. 72, p. 17.
- Luiken, 2015 – LUIKEN, M. « Introduction to smart grids - Part II », *IEEE Canada Review*, vol. 72, p. 17.
- Lüthi *et al.*, 2008 – LÜTHI, D., M. L. FLOCH, B. BEREITER, T. BLUNIER, J.-M. BARNOLA, U. SIEGENTHALER, ... T. F. STOCKER. « High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present », *Nature*, vol. 453, p. 379-382.
- Markandya et Wilkinson, 2007 – MARKANDYA, A. et P. WILKINSON. « Electricity generation and health », *The Lancet*, vol. 370, n°9591, p. 979-990.
- Martin *et al.*, 2012 – MARTIN, S. L., S. ÇAKMAK, C. A. HEBBERN, M. AVRAMESCU et N. TREMBLAY. « Climate change and future temperature-related mortality in 15 Canadian cities », *International Journal of Biometeorology*, vol. 56, p. 605-619.
- McGlade et Ekins, 2015 – MCGLADE, C. et P. EKINS. « The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2°C », *Nature*, vol. 517, n°7533, p. 187-190.
- McKibben, 2015 – MCKIBBEN, B. « Power to the People: Why the Rise of Green Energy Makes Utility Companies Nervous ». *The New Yorker* (29 juin).
- Mendonca *et al.*, 2009 – MENDONCA, M., S. LACEY et F. HVELPLUND. « Stability, participation and transparency in renewable energy policy: Lessons from Denmark and the United States », *Policy and Society*, vol. 27, p. 379-398.
- Merriman, 2009 – MERRIMAN, P. « Automobility and the geographies of the car », *Geography Compass*, vol. 3, n°2, p. 586-599.
- Meyer *et al.*, 2012 – MEYER, D., L. MYTELKA, R. PRESS, E.L. DALL'OGGIO, DE SOUSA JR, P.T. et A. GRUBLER. « Brazilian Ethanol: Unpacking a Success Story of Energy Technology Innovation: Historical Case Studies of Energy Technology Innovation », dans, Grubler A., F. Aguayo, K. S. Gallagher, M. Hekkert, K. Jiang, L. Mytelka, ... C. Wilson (éd.), *Global Energy Assessment*, Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press.

- MFCB, 2013 – MINISTÈRE DES FINANCES DE LA COLOMBIE-BRITANNIQUE. *June Update: Budget and Fiscal Plan 2013/14-2015/16*, Victoria, BC, MFCB.
- Michalek *et al.*, 2011 – MICHALEK, J. J., M. CHESTER, P. JARAMILLO, C. SAMARAS, C.-S. N. SHIAU et L. B. LAVE. « Valuation of plug-in vehicle life-cycle air emissions and oil displacement benefits », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 108, n°40, p. 16554-16558.
- Milford *et al.*, 2011 – MILFORD, R. L., J. M. ALLWOOD et J. M. CULLEN. « Assessing the potential of yield improvements, through process scrap reduction, for energy and CO<sub>2</sub> abatement in the steel and aluminium sectors », *Resources, Conservation and Recycling* vol. 55, p. 1185-1195.
- MIT, 2011 – MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. *Managing Large-Scale Penetration of Intermittent Renewables*, Cambridge, MA, MIT Energy Initiative.
- MIT, 2015 – MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. *Non-Power Plant Carbon Dioxide Capture and Storage Projects*. Adresse : [http://sequestration.mit.edu/tools/projects/storage\\_only.html](http://sequestration.mit.edu/tools/projects/storage_only.html) (consulté en mai 2015).
- Mitchell *et al.*, 2011 – MITCHELL, C., J. L. SAWIN, G. R. POKHAREL, D. KAMMEN, Z. WANG, S. FITTA, ... K. YAMAGUCHI. « Policy, Financing and Implementation », dans, Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, ... C. von Stechow (réd.), *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, New York, NY, Cambridge University Press.
- MITeI, 2015 – MIT ENERGY INITIATIVE. *Boundary Dam Fact Sheet: Carbon Dioxide Capture and Storage Project*. Adresse : [https://sequestration.mit.edu/tools/projects/boundary\\_dam.html](https://sequestration.mit.edu/tools/projects/boundary_dam.html) (consulté en mai 2015).
- Moorhouse et Peachey, 2007 – MOORHOUSE, J. et B. PEACHEY. « Cogeneration and the Alberta Oil Sands - Cogeneration Benefits are Maximized with Extraction and Upgrading Integration ». *Cogeneration and On-site Power Production*. (7 janvier).
- Myhre *et al.*, 2013 – MYHRE, G., D. SHINDELL, F.-M. BRÉON, W. COLLINS, J. FUGLESTVEDT, J. HUANG, ... H. ZHANG. « Anthropogenic and Natural Radiative Forcing », dans, Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, ... P. M. Midgley (réd.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, New York, NY, Cambridge University Press.
- NACSA, 2012 – NORTH AMERICAN CARBON STORAGE ATLAS. *North American Carbon Storage Atlas 2012: First Edition*, Ottawa, ON, Mexico City, Mexico, et Washington, DC, NACSA.
- Naess, 2006 – NAESS, P. *Urban Structure Matters: Residential Location, Car Dependence and Travel Behaviour*. Oxfordshire, Royaume-Uni, Routledge.
- NAPEE, 2007 – NATIONAL ACTION PLAN FOR ENERGY EFFICIENCY. *Aligning Utility Incentives with Investment in Energy Efficiency: A Resource of the National Action Plan for Energy Efficiency*, Washington, DC, Environmental Protection Agency.
- Newell *et al.*, 2013 – NEWELL, R. G., W. A. PIZER et D. RAIMI. « Carbon markets 15 years after Kyoto: Lessons learned, new challenges », *Journal of Economic Perspectives*, vol. 27, n°1, p. 123-146.
- NOAA, 2015 – NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. *State of the Climate: Global Analysis - Annual 2014*, Washington, DC, NOAA National Climatic Data Center.
- Nordhaus, 2008 – NORDHAUS, W. D. *A Question of Balance*. New Haven, CT, Yale University Press.
- Nordhaus, 2013 – NORDHAUS, W. D. *The Climate Casino: Risk, Uncertainty, and Economics for a Warming World*. New Haven, CT, Yale University Press.
- Nordhaus, 2015 – NORDHAUS, W. D. « Climate clubs: Overcoming free-riding in international climate policy », *American Economic Review*, vol. 105, n°4, p. 1339-1370.

- Nordhaus et Boyer, 2000 – NORDHAUS, W. D. et M. BOYER. *Warming the World: Economic Models of Global Warming*. Cambridge, MA, MIT Press.
- Norman *et al.*, 2006 – NORMAN, J., H. L. MACLEAN et C. A. KENNEDY. « Comparing high and low residential density: Life-cycle analysis of energy use and greenhouse gas emissions », *Journal of Urban Planning and Development*, vol. March, p. 10-21.
- NRC, 2007 – NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Environmental Impacts of Wind-Energy Projects*, Washington, DC, National Academies Press.
- NRC, 2008 – NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *What You Need to Know About Energy*, Washington, DC, National Academies Press.
- NRC, 2010 – NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Hidden Costs of Energy: Unpriced Consequences of Energy Production and Use*, Washington, DC, National Academies Press.
- NRC, 2011 – NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Renewable Fuel Standard: Potential Economic and Environmental Effects of U.S. Biofuel Policy*, Washington, DC, National Academies Press.
- NRC, 2013 – NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Transitions to Alternative Vehicles and Fuels*, Washington, DC, National Academies Press.
- NRC, 2015a – NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Climate Intervention: Reflecting Sunlight to Cool Earth*, Washington, DC, National Academies Press.
- NRC, 2015b – NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Climate Intervention: Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration*, Washington, DC, National Academies Press.
- OCDE, 2011 – ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES. *Études de l'OCDE sur l'innovation environnementale. Les politiques de soutien à l'éco-innovation*, Paris, France, OECD Publishing.
- OMM, 2013 – ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE. *Le climat dans le monde 2001-2010 : Une décennie d'extrêmes climatiques*, Genève, Suisse.
- OMM, 2014 – ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE. *Bulletin de l'OMM sur les gaz à effet de serre*, Genève, Suisse, OMM.
- OMS, 2011 – ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ. *Health in the Green Economy: Health Co-Benefits of Climate Change Mitigation - Transportation Sector*, Genève, Suisse, OMS.
- ONÉ, 2010 – OFFICE NATIONAL DE L'ÉNERGIE. *La consommation d'énergie dans l'industrie au Canada : nouvelles tendances*, Calgary, AB, ONÉ.
- ONÉ, 2013 – OFFICE NATIONAL DE L'ÉNERGIE. *Avenir énergétique du Canada en 2013 - Offre et demande énergétiques à l'horizon 2035*, Calgary, AB, ONÉ.
- ONÉ, 2014 – OFFICE NATIONAL DE L'ÉNERGIE. *Aperçu du marché : Diminution des importations de pétrole brut au Canada*. Adresse : <https://www.neb-one.gc.ca/nrg/ntgrtd/mrkt/snpsht/2014/11-01Imptr-fra.html> (consulté en juillet 2015).
- ONÉ, 2015 – OFFICE NATIONAL DE L'ÉNERGIE. *Gaz naturel*. Adresse : <http://www.neb-one.gc.ca/nrg/sttstc/ntrlgs/index-fra.html> (consulté en juillet 2015).
- ONÉ *et al.*, 2008 – OFFICE NATIONAL DE L'ÉNERGIE, BRITISH COLUMBIA OIL AND GAS COMMISSION, ENERGY RESOURCES CONSERVATION BOARD, SASKATCHEWAN MINISTRY OF ENERGY AND RESOURCES, MANITOBA SCIENCE, TECHNOLOGY, ENERGY AND MINES, CANADA-NEWFOUNDLAND AND LABRADOR OFFSHORE PETROLEUM BOARD, et NEWFOUNDLAND AND LABRADOR DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES. *World Bank Global Gas Flaring Reduction - Private Public Partnership Implementation Plan for Canadian Regulatory Authorities*, Washington, DC, Banque mondiale.
- ONUDI, 2010 – ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR LE DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL. *Renewable Energy in Industrial Applications: An Assessment of the 2050 Potential*, Vienne, Autriche, ONUDI.

- Palen *et al.*, 2014 – PALEN, W., T. D. SISK, M. E. RYAN, J. L. ÁRVAI, M. JACCARD, A. K. SALOMON, ... K. P. LERTZMAN. « Energy: Consider the global impacts of oil pipelines », *Nature*, vol. 510, n°7506, p. 465-467.
- PBS, 1997 – PUBLIC BROADCASTING SERVICE. *Why the French Like Nuclear Energy*. Adresse : <http://www.pbs.org/wgbh/pages/frontline/shows/reaction/readings/french.html> (consulté en mars 2015).
- PEEIC et CSPA, 2007 – LE PROGRAMME D'ÉCONOMIE D'ÉNERGIE DANS L'INDUSTRIE CANADIENNE ET ASSOCIATION CANADIENNE DES PRODUCTEURS D'ACIER. *Analyse comparative de l'intensité énergétique dans l'industrie sidérurgique canadienne*, Ottawa, ON, Office de l'efficacité énergétique, Ressources naturelles Canada.
- Picard, s.d. – PICARD, D. *Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Activities: Background Paper for Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*, Genève, Suisse, GIEC.
- Pirnia *et al.*, 2011 – PIRNIA, M., J. NATHWANI et D. FULLER. « Ontario feed-in-tariffs: System planning implications and impacts on social welfare », *The Electricity Journal*, vol. 24, n°8, p. 18-28.
- Porter *et al.*, 2014 – PORTER, J. R., L. XIE, A. J. CHALLINOR, K. COCHRANE, S. M. HOWDEN, M. M. IQBAL, ... M. I. TRAVASSO. « Food Security and Food Production Systems », dans, Field, C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, ... L.L.White (réd.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, New York, NY, Cambridge University Press.
- Pörtner *et al.*, 2014 – PÖRTNER, H.-O., D. M. KARL, P. W. BOYD, W. W. L. CHEUNG, S. E. LLUCH-COTA, Y. NOJIRI, ... P. O. ZAVIALOV. « Ocean Systems », dans, Field, C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, ... L.L.White (réd.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, New York, NY, Cambridge University Press.
- Premiers ministres, 2015 – PREMIERS MINISTRES. *Stratégie canadienne de l'énergie*, Ottawa, ON, Premiers ministres des provinces et territoires: Le Conseil de la fédération.
- Procter, 2013 – PROCTER, R. « Integrating time-differentiated rates, demand response, and smart grid to manage power system costs », *The Electricity Journal* vol. 26, p. 50-60.
- PTAE, 2013 – PROJET TROTTIER POUR L'AVENIR ÉNERGÉTIQUE. *An Inventory of Low-Carbon Energy for Canada*, Ottawa, ON, PTAE.
- Rabe, 2007 – RABE, B. « Race to the top: The expanding role of U.S. state renewable portfolio standards », *Sustainable Development Law and Policy*, vol. 7, n°3, p. 10-17.
- RCE, 2015 – RÉSEAUX DE CENTRES D'EXCELLENCE. *Programme des réseaux de centres d'excellence*. Adresse : [http://www.nce-rce.gc.ca/NetworksCentres-CentresReaux/ByProgram-ParProgramme\\_fra.asp](http://www.nce-rce.gc.ca/NetworksCentres-CentresReaux/ByProgram-ParProgramme_fra.asp) (consulté en juillet 2015).
- Rhodes *et al.*, 2014 – RHODES, E., J. AXSEN et M. JACCARD. « Does effective climate policy require well-informed citizen support? », *Global Environmental Change*, vol. 29, p. 92-104.
- Riahi *et al.*, 2012 – RIAHI, K., F. DENTENER, D. GIELEN, A. GRUBLER, J. JEWELL, Z. KLIMONT, ... C. WILSON. « Chapter 17 - Energy Pathways for Sustainable Development », dans, *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*, New York, NY, Cambridge University Press and the International Institute for Applied Systems Analysis.
- Rickwood *et al.*, 2011 – RICKWOOD P., G. GLAZEBROOK et G. SEARLE. « Urban structure and energy — A Review », *Urban Policy and Research*, vol. 26, p. 57-81.

- Risky Business, s.d. – RISKY BUSINESS. *About the Project*. Adresse : <http://riskybusiness.org/about/> (consulté en février 2015).
- Rivers et Jaccard, 2009 – RIVERS, N. et M. JACCARD. « Talking Without Walking: Canada's Ineffective Climate Effort », dans, Eberlein, B. et G. B. Doern (réd.), *Governing the Energy Challenge: Canada and Germany in a Multi-Level Regional and Global Context*, Toronto, ON, University of Toronto Press.
- Rivers et Schaufele, 2012 – RIVERS, N. et B. SCHAUFELE. *Carbon Tax Salience and Gasoline Demand*, Ottawa, ON, Université d'Ottawa.
- RNCan, 2004 – RESSOURCES NATURELLES CANADA. *Le chauffage et le refroidissement à l'aide d'une thermopompe*, Ottawa, ON, RNCan.
- RNCan, 2010 – RESSOURCES NATURELLES CANADA. *Évaluation de l'efficacité énergétique pour l'industrie, les habitations et les bâtiments*, Ottawa, ON, RNCan.
- RNCan, 2012a – RESSOURCES NATURELLES CANADA. *Gaz de schiste*. Adresse : <http://www.nrcan.gc.ca/energy/natural-gas/5687> (consulté en juillet 2015).
- RNCan, 2012b – RESSOURCES NATURELLES CANADA. *Améliorer le rendement énergétique au Canada : rapport au Parlement en vertu de la Loi sur l'efficacité énergétique, pour l'année financière 2011-2012*, Ottawa, ON, RNCan.
- RNCan, 2013 – RESSOURCES NATURELLES CANADA. *Évolution de l'efficacité énergétique au Canada, de 1990 à 2010*, Ottawa, ON, RNCan.
- RNCan, 2014a – RESSOURCES NATURELLES CANADA. *Guide du Règlement sur l'efficacité énergétique du Canada*, Ottawa, ON, RNCan.
- RNCan, 2014b – RESSOURCES NATURELLES CANADA. *Cahier d'information, les marchés de l'énergie*, Ottawa, ON, RNCan.
- RNCan, 2014c – RESSOURCES NATURELLES CANADA. *Guide de données sur la consommation d'énergie*, Ottawa, ON, RNCan.
- RNCan, 2014d – RESSOURCES NATURELLES CANADA. *À propos de l'uranium*. Adresse : <http://www.nrcan.gc.ca/energie/uranium-nucleaire/7696> (consulté en octobre 2014).
- RNCan, 2014e – RESSOURCES NATURELLES CANADA. *North American Tight Light Oil*. Adresse : <https://www.nrcan.gc.ca/energy/crude-petroleum/4559> (consulté en juillet 2015).
- RNCan, 2014f – RESSOURCES NATURELLES CANADA. *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*, Ottawa, ON, RNCan.
- RNCan, 2014g – RESSOURCES NATURELLES CANADA. *Biomasse, bioénergie et bioproduits*. Adresse : <http://www.nrcan.gc.ca/forests/industry/13315> (consulté en janvier 2015).
- RNCan, 2014h – RESSOURCES NATURELLES CANADA. *Base de données nationale sur la consommation d'énergie*. Adresse : <http://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/accueil.cfm> (consulté en mars 2015).
- Rogner *et al.*, 2012 – ROGNER, H.-H., R. F. AGUILERA, C. ARCHER, R. BERTANI, S. C. BHATTACHARYA, M. B. DUSSEULT, ... V. YAKUSHEV. « Chapter 7 - Energy Resources and Potentials », dans, Global Energy Assessment - *Toward a Sustainable Future*, New York, NY, Cambridge University Press and the International Institute for Applied Systems Analysis.
- Romero-Lankao *et al.*, 2014 – ROMERO-LANKAO, P., J. B. SMITH, D. J. DAVIDSON, N. S. DIFFENBAUGH, P. L. KINNEY, P. KIRSHEN, ... L. V. RUIZ. « North America », dans, Barros, V. R., C. B. Field, D. J. Dokken, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, T. E. Bilir, ... L.L.White (réd.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, New York, NY, Cambridge University Press.

- Rowlands, 2014 – ROWLANDS, I. « Renewable electricity politics across borders », *The Encyclopedia of Earth*.
- Sachs *et al.*, 2014 – SACHS, J., L. TUBIANA, E. GUERIN, H. WAISMAN, C. MAS, M. COLOMBIER et G. SCHMIDT-TRAUB. *Pathways to Deep Decarbonization: Final 2014 Report*, Paris, France, Sustainable Development Solutions Network et Institut du développement durable et des relations internationales.
- SaskPower, 2014a – SASKPOWER. *SaskPower CCS Boundary Dam Carbon Capture Project: Fact Sheet*, Regina, SK, SaskPower.
- SaskPower, 2014b – SASKPOWER. *Carbon Storage and Research Centre*. Adresse : <http://www.saskpowerccs.com/ccs-projects/carbon-storage-and-research-centre/> (consulté en mai 2015).
- Sathaye *et al.*, 2011 – SATHAYE, J., O. LUCON, A. RAHMAN, J. CHRISTENSEN, F. DENTON, J. FUJINO, ... A. SHMAKIN. « Renewable Energy in the Context of Sustainable Development », dans, Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, . . . C. von Stechow (éd.), *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, New York, NY, Cambridge University Press.
- Schiermeier, 2015 – SCHIERMEIER, Q. « Courts weigh in on climate change », *Nature*, vol. 523, p. 18-19.
- Schlömer *et al.*, 2014 – SCHLÖMER, S., T. BRUCKNER, L. FULTON, E. HERTWICH, A. MCKINNON, D. PERCZYK, ... R. WISER. « Annex III: Technology-Specific Cost and Performance Parameters », dans, Edenhofer, O., R. , Y. Pichs-Madruga, E. Sokona, S. Farahani, K. Kadner, A. Seyboth, . . . J. C. Minx (éd.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, New York, NY, Cambridge University Press.
- SEF Alliance, 2008 – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME SUSTAINABLE FINANCE INITIATIVE PUBLIC FINANCE ALLIANCE. *Public Venture Capital Study: Venture capital as a clean energy financing tool with specific analysis on the role of public sector-sponsored venture capital*, Basel, Suisse, UNEP.
- Settele *et al.*, 2014 – SETTELE, J., R. SCHOLES, R. BETTS, S. BUNN, P. LEADLEY, D. NEPSTAD, ... M. A. TABOADA. « Terrestrial and Inland Water Systems », dans, Field, C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, . . . L.L.White (éd.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, New York, NY, Cambridge University Press.
- Shaffer, 2010 – SHAFER, G. « Long-term effectiveness and consequences of carbon dioxide sequestration », *Nature Geoscience*, vol. 3, n°7, p. 464-467.
- Shalizi et Lecocq, 2009 – SHALIZI, Z. et F. LECOCQ. *Climate Change and the Economics of Targeted Mitigation in Sectors with Long-Lived Capital Stock*, Washington, DC, Banque mondiale.
- Sharp *et al.*, 2009 – SHARP, J. D., M. K. JACCARD et D. W. KEITH. « Anticipating public attitudes toward underground CO<sub>2</sub> storage », *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 3, n°5, p. 641-651.
- Sims *et al.*, 2011 – SIMS, R., P. MERCADO, W. KREWITT, G. BHUYAN, D. FLYNN, H. HOLTINEN, ... F. VAN HULLE. « Integration of Renewable Energy into Present and Future Energy Systems », dans, O. Edenhofer, R. PichsMadruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, . . . C. von Stechow (éd.), *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, New York, NY, Cambridge University Press.

- Sims *et al.*, 2014 – SIMS, R., R. SCHAEFFER, F. CREUTZIG, X. CRUZ-NÚÑEZ, M. D'AGOSTO, D. DIMITRIU, ... G. TIWARI. « Transport », dans, Edenhofer, O., R., Y. Pichs-Madruga, E. Sokona, S. Farahani, K. Kadner, A. Seyboth, . . . J. C. Minx (éd.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, New York, NY, Cambridge University Press.
- Sinn, 2008 – SINN, H.-W. « Public policies against global warming: A supply side approach », *International Tax and Public Finance*, vol. 15, n°4, p. 360-394.
- Small, 2012 – SMALL, K. A. « Energy policies for passenger motor vehicles », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 46, p. 874-889.
- Smil, 2010 – SMIL, V. *Energy Myths and Realities: Bringing Science to the Energy Policy Debate*. Washington, DC, The AEI Press.
- Smil, 2014 – SMIL, V. « Start a rail renaissance », *Literary Review of Canada Special Supplement: Vital Ideas for Canada*, vol. November 2014, p. 6-7.
- Smith *et al.*, 2012 – SMITH, K. R., K. BALAKRISHNAN, C. BUTLER, Z. CHAFE, I. FAIRLIE, P. KINNEY, ... M. SCHNEIDER. « Chapter 4 - Energy and Health », dans, (éd.), *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*, New York, NY, Cambridge University Press et International Institute for Applied Systems Analysis.
- Smith *et al.*, 2014a – SMITH, K. R., A. WOODWARD, D. CAMPBELL-LENDRUM, D. D. CHADEE, Y. HONDA, Q. LIU, ... R. SAUERBORN. « Human Health: Impacts, Adaptation, and Co-Benefits », dans, Field, C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, . . . L.L.White (éd.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, New York, NY, Cambridge University Press.
- Smith *et al.*, 2014b – SMITH P., M. BUSTAMANTE, H. AHAMMAD, H. CLARK, H. DONG, E.A. ELSIDDIG, ... F. TUBIELLO. « Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU) », dans, Edenhofer, O., R., Y. Pichs-Madruga, E. Sokona, S. Farahani, K. Kadner, A. Seyboth, . . . J. C. Minx (éd.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, New York, NY, Cambridge University Press.
- Sorrell, 2007 – SORRELL, S. *The Rebound Effect: An Assessment of the Evidence for Economy-wide Energy Savings from Improved Energy Efficiency*, Londres, Royaume-Uni, UK Energy Research Centre.
- Statistique Canada, 2014 – STATISTIQUES CANADA. *Population par année, par province et territoire, CANSIM tableau 051-0001*, Ottawa, ON, Statistique Canada.
- Statistique Canada, 2015 – STATISTIQUE CANADA. *Tableau 326-0009 - Prix de détail moyens, essence, Toronto, mensuel*, Ottawa, ON, Statistique Canada.
- Stavins, 1997 – STAVINS, R. « Policy instruments for climate change: How can national governments address a global problem? », *The University of Chicago Legal Forum*, n°293-329.
- Stavins, 1998 – STAVINS, R. N. « What can we learn from the grand policy experiment? Lessons from SO<sub>2</sub> allowance trading », *The Journal of Economic Perspectives*, vol. 12, n°3, p. 69-88.
- Stern, 2006 – STERN, N. *Stern Review: The Economics of Climate Change*, Londres, Royaume-Uni, HM Treasury.
- TDDC, 2015a – TECHNOLOGIES DU DÉVELOPPEMENT DURABLE CANADA. *Retombées environnementales*. Adresse : <https://www.sdct.ca/fr/resultats/retombees-environnementales> (consulté en août 2015).

- TDDC, 2015b – TECHNOLOGIES DU DÉVELOPPEMENT DURABLE CANADA. *Le Fonds de technologies du DD*. Adresse : <https://www.sdtc.ca/fr/demandes/le-fonds-de-technologies-du-dd> (consulté en juillet 2015).
- TDDC, 2015c – TECHNOLOGIES DU DÉVELOPPEMENT DURABLE CANADA. *#CestÇaL'écotech: rapport annuel 2014*, Ottawa, ON, TDDC.
- Tessum *et al.*, 2014 – TESSUM, C. W., J. D. HILL et J. D. MARSHALL. « Life cycle air quality impacts of conventional and alternative light-duty transportation in the United States », *Proceedings of the National Academies of Sciences*, vol. 111, n°52, p. 18490-18495.
- The Royal Society et National Academies of Sciences, 2014 – THE ROYAL SOCIETY et NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES. *Climate Change Evidence and Causes: An Overview from the Royal Society and the US National Academy of Sciences*, Washington, DC, National Academies Press.
- Thomson et Infield, 2007 – THOMSON, M. et D. INFELD. « Impact of widespread photovoltaics generation on distribution systems », *IET Renewable Power Generation*, vol. 1, n°1, p. 33-40.
- Tol, 2009 – TOL, R. S. J. « The economic effects of climate change », *Journal of Economic Perspectives*, vol. 23, n°2, p. 29-51.
- Tol, 2014 – TOL, R. S. J. « Correction and update: The economic effects of climate change », *Journal of Economic Perspectives*, vol. 28, n°2, p. 221-226.
- TPSGC, 2014 – TRAVAUX PUBLICS ET SERVICES GOUVERNEMENTAUX CANADA. *Policy on Green Procurement - Questions and Answers*. Adresse : <http://www.tpsgc-pwgsc.gc.ca/ecologisation-greening/achats-procurement/questions-eng.html> (consulté en février 2015).
- TRNEE, 2009 – TABLE RONDE NATIONALE SUR L'ENVIRONNEMENT ET L'ÉCONOMIE. *Objectif 2050 : Politique de prix pour le carbone pour le Canada*, Ottawa, ON, TRNEE.
- TRNEE, 2011 – TABLE RONDE NATIONALE SUR L'ENVIRONNEMENT ET L'ÉCONOMIE. *Voies parallèles - choix de politiques climatiques pour le Canada et les É.-U.*, Ottawa, ON, TRNEE.
- Ürge-Vorsatz *et al.*, 2012 – ÜRGE-VORSATZ, D., N. EYRE, P. GRAHAM, D. HARVEY, E. HERTWICH, Y. JIANG, ... A. NOVIKOVA. « Chapter 10 - Energy End-Use: Building », dans *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*, New York, NY, Cambridge University Press et International Institute for Applied Systems Analysis.
- Vaughan *et al.*, 2013 – VAUGHAN, D. G., J. C. COMISO, I. ALLISON, J. CARRASCO, G. KASER, R. KWOK, ... T. ZHANG. « Observations: Cryosphere », dans T.F., S., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, . . . P. M. Midgley (éd.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, New York, NY, Cambridge University Press.
- Victor, 2011 – VICTOR, D.G. *Global Warming Gridlock: Creating More Effective Strategies for Protecting the Planet*. Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press.
- Viguié, 2000 – VIGUIER, L. *Fair Trade and Harmonization of Climate Change Policies in Europe*, Cambridge, MA, MIT Joint Program on the Science et Policy of Global Change.
- Ville de Vancouver, 2014 – VILLE DE VANCOUVER. *Greenest City 2020 Action Plan: 2013-2014 Implementation Update*, Vancouver, BC, Ville de Vancouver.
- Ville de Vancouver, s.d. – VILLE DE VANCOUVER. *Neighbourhood Energy Utility*, Vancouver, BC, Ville de Vancouver.
- Wagner et Weitzman, 2015 – WAGNER, G. et M. WEITZMAN. *Climate Shock*. Princeton, NJ, Princeton University Press.

- Walker, 1995 – WALKER, G. « Energy, land use and renewables: A changing agenda », *Land Use Policy*, vol. 12, n°1, p. 3-6.
- Weitzman, 2009 – WEITZMAN, M. « On modeling and interpreting the economics of catastrophic climate change », *Review of Economics and Statistics*, vol. 91, n°1, p. 1-19.
- Weitzman, 2011 – WEITZMAN, M. « Fat-tailed uncertainty in the economics of catastrophic climate change », *Review of Environmental Economics and Policy*, vol. 5, n°2, p. 275-292.
- West *et al.*, 2013 – WEST, J. J., S. J. SMITH, R. A. SILVA, V. NAIK, Y. ZHANG, Z. ADELMAN, ... J.-F. LAMARQUE. « Co-benefits of global greenhouse gas mitigation for future air quality and human health », *Nature Climate Change*, vol. 3, n°10, p. 885-889.
- WGMS, 2013 – WORLD GLACIER MONITORING SERVICE. *Glacier Mass Balance Bulletin No. 12 (2010-2011)*, Zurich, Suisse, WGMS.
- Wicke *et al.*, 2012 – WICKE, B., P. VERWEIJ, H. VAN MEIJL, D. P. VAN VUUREN et A. P. C. FAAIJ. « Indirect land use change: Review of existing models and strategies for mitigation », *Biofuels*, vol. 3, n°1, p. 87-100.
- Wiser *et al.*, 2011 – WISER, R., Z. YANG, M. HAND, O. HOHMEYER, D. INFELD, P. H. JENSEN, ... A. ZERVOS. « Wind Energy », dans Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, . . . C. von Stechow (réd.), *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, New York, NY, Cambridge University Press.
- WNA, 2015 – WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. *Nuclear Power in Canada*. Adresse : <http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/Canada-Nuclear-Power/> (consulté en mai 2015).
- Woodall *et al.*, 2009 – WOODALL, C. W., C. M. OSWALT, J. A. WESTFALL, C. H. PERRY, M. D. NELSON et A. O. FINLEY. « An indicator of tree migration in forests of the eastern United States », *Forest Ecology and Management*, vol. 257, p. 1434-1444.
- WRI, 2014 – WORLD RESOURCES INSTITUTE. *CAIT 2.0*. Adresse : <http://cait2.wri.org/wri> (consulté en novembre 2014).

## Rapports du Conseil des académies Canadiennes d'intérêt

Les rapports d'évaluation ci-dessous peuvent être téléchargés depuis le site Web du CAC : ([www.sciencepourlepublic.ca](http://www.sciencepourlepublic.ca)):



Solutions technologiques pour réduire l'empreinte Écologique de l'exploitation des sables bitumineux au Canada (2015)



Prix de l'énergie et prise de décision dans les entreprises au Canada : Paver la voie à un avenir énergétique (2014)



Promouvoir la durabilité dans un monde interconnecté (2014)



Incidences environnementales liées à l'extraction du gaz de schiste au Canada (2014)



L'état de la R-D industrielle au Canada (2013)



L'état de la science et de la technologie au Canada, 2012 (2012)

## Conseil des gouverneurs du Conseil des académies canadiennes\*

**Margaret Bloodworth, C.M., présidente**, ancienne sousministre au fédéral et conseillère nationale pour la sécurité (Ottawa, Ont.)

**Graham Bell, MSRC**, président, Société royale du Canada; directeur de recherche, professeur titulaire de la chaire James McGill, Département de biologie, Université McGill (Montréal, Qc)

**John Cairns, MACSS**, président, Académie canadienne des sciences de la santé; professeur de médecine, Université de la Colombie-Britannique (Vancouver, C.-B.)

**Henry Friesen, C.C., MSRC, MACSS (vice-président)**, professeur émérite distingué et membre principal du Centre pour le progrès de la médecine, Faculté de médecine, Université du Manitoba (Winnipeg, Man.)

**Carol P. Herbert, MACSS**, professeure de médecine familiale, Université Western (London, Ont.)

**Claude Jean**, premier vice-président et directeur général, Teledyne DALSA, Semiconducteur (Bromont, Qc)

**Peter MacKinnon, O.C.**, ancien président et vice-recteur, Université de la Saskatchewan (Saskatoon, Sask.)

**Richard J. Marceau, FACG**, vice-président (recherche), Université Memorial de Terre-Neuve (St. John's, T.-N.)\*\*

**Jeremy McNeil, MSRC**, professeur Helen Battle d'écologie chimique, Département de biologie, Université Western (London, Ont.)

**Axel Meisen, C.M., FACG**, ancien président, Prévision, Alberta Innovates – Technology Futures (AITF) (Edmonton, Alb.)

**Lydia Miljan**, professeure est agrégée en sciences politiques et directrice du programme des arts et des sciences, Université de Windsor (Windsor, Ont.)

**Ted Morton**, chercheur principal, École des politiques publiques; professeur de sciences politiques, Université de Calgary (Calgary, Alb.)

---

\* Renseignements à jour en août 2015

\*\* Nommé en juillet 2015, après que l'examen par les pairs fut complété

## **Comité consultatif scientifique du Conseil des académies canadiennes\***

**Susan A. McDaniel, MSRC (présidente)**, directrice de l'Institut Prentice; titulaire de la Chaire de recherche du Canada de premier niveau sur la population mondiale et le cours de la vie; titulaire de la chaire de recherche Prentice en démographie et économie mondiales; professeure de sociologie, Université de Lethbridge (Lethbridge, Alb.)

**Lorne Babiuk, O.C., MSRC, MACSS**, vice-président à la recherche, Université de l'Alberta (Edmonton, Alb.)

**Murray S. Campbell**, premier responsable, Programme de recherche en analytique des affaires, Centre de recherche T.J. Watson d'IBM (Yorktown Heights, NY)

**Clarissa Desjardins**, présidente-directrice générale, Clementia Pharmaceuticals Inc. (Montréal, Qc)

**Jean Gray, C.M., MACSS**, professeure émérite de médecine, Université Dalhousie (Halifax, N.-É.)

**John Hepburn, MSRC**, vice-président à la recherche et aux affaires internationales, Université de la Colombie-Britannique (Vancouver, C.-B.)

**Gregory S. Kealey, MSRC**, professeur, Département d'histoire, Université du Nouveau-Brunswick (Fredericton, N.-B.)

**Daniel Krewski**, professeur d'épidémiologie et de médecine communautaire, directeur scientifique du Centre R. Samuel McLaughlin d'évaluation du risque sur la santé des populations, Université d'Ottawa (Ottawa, Ont.)

**Avrim Lazar**, ancien président et chef de la direction, Association des produits forestiers du Canada (Ottawa, Ont.)

**Norbert R. Morgenstern, C.M., MSRC, FACG**, professeur émérite d'université en génie civil, Université de l'Alberta (Edmonton, Alb.)

**Sarah P. Otto, MSRC**, professeure et directrice du Centre de recherche sur la biodiversité, Université de la Colombie-Britannique (Vancouver, C.-B.)

---

\* Renseignements à jour en août 2015





Council of Canadian Academies  
Conseil des académies canadiennes

Conseil des académies canadiennes  
180, rue Elgin, bureau 1401  
Ottawa (Ontario) K2P 2K3  
Tél.: 613 567-5000  
[www.sciencepourlepublic.ca](http://www.sciencepourlepublic.ca)